

# **ESTUDO DO FENÓMENO DE SECAGEM EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO POROSOS**

Simulação numérica com o TRHUMIDADE

**JOÃO PEDRO GUIMARÃES GOMES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos  
Guimarães Teixeira

---

Coorientador: Professora Doutora Isabel Cristina da Silva Martins  
Ribeiro

*Junho de 2017*

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe e irmãos

*Disciplina é a ponte entre metas e realizações.*

*Jim Rohn*



## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação, apesar de ser uma tarefa individual, só foi possível com um conjunto de ajudas para a sua realização.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Ana Sofia Guimarães, e à minha coorientadora, pela disponibilidade, apoio, paciência e pela motivação e confiança que sempre transmitiram.

Um agradecimento à minha família por todo o apoio e carinho incondicional.

Agradeço aos meus amigos por estarem sempre presentes nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento em especial para o meu pai e para o meu avô que infelizmente não poderei ter o privilégio de os ter ao meu lado ao concluir esta etapa da minhas.



## **RESUMO**

Os materiais de construção correntemente utilizados na construção são de carater poroso, portanto têm uma grande capacidade para reter líquidos no interior. As ocorrências de muitas patologias estão intrinsecamente ligadas à presença de água nos materiais.

O processo de secagem também tem um papel importante na formação de alguns materiais que poderão ser utilizados como elementos na construção, como o betão e o tratamento da madeira.

O estudo continuo do processo de secagem dos materiais de construção é de extrema relevância, pois para além do facto de estar associada à ocorrência de patologias, é um processo de transferência de massa complexo no qual ocorrem mudanças físico-químicas e também se tem verificado que ao longo do tempo tem ocorrido um incremento da complexidade da constituição das paredes.

Este trabalho teve como objetivo principal analisar e avaliar a sensibilidade de parâmetros ambientais no processo de secagem em materiais de construção porosos. Para que fosse possível realizar este estudo, recorreu-se a uma ferramenta de simulação numérica do desempenho higrotérmico de elementos que constituem edifícios denominada TRHUMIDADE.

Para que fosse possível desenvolver o presente trabalho houve a necessidade fazer um estudo dos fundamentos da secagem como também de dominar a ferramenta de simulação avançada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Secagem, teor de humidade, estudo de sensibilidade, TRHUMIDADE, Simulação.





## **ABSTRACT**

The building materials commonly used in the construction are of porous character, therefore they have a great capacity to retain liquids inside. The occurrences of many pathologies are intrinsically linked to the presence of water in the material.

The drying process also have an important role in the formation of some materials that can be used as building elements, such as concrete and wood treatment.

The continuous study of the drying process of buildings is extremely relevant, because in addition to the fact that it is associated with the occurrence of pathologies, it is a complex mass transfer process in which physical-chemical changes occur and it has also been verified that over time there has been an increase in the complexity of the constitution of the wall.

This work had as main objective to analyse and evaluate the sensitivity of environmental parameters in the drying process in porous building materials. In order to perform this study, a numerical simulation tool for the hygrothermal performance of building elements called TRHUMIDADE was used.

To develop the present work, it was necessary to study the drying basics as well as to master the advanced simulation tool.

**KEYWORDS:** Drying, moisture content, sensitivity study, TRHUMIDADE, simulation.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS.....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. FUNDAMENTOS DA SECAGEM</b> .....	3
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. MECANISMOS DE SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS .....	3
2.2.1. DEFINIÇÃO DE SECAGEM.....	3
2.2.2. CARATERÍSTICAS RELEVANTES PARA O ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM.....	4
2.2.2.1. Porosidade .....	4
2.2.2.1. Teor de humidade.....	5
2.2.2.1. Higroscopicidade .....	5
2.2.3. PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS .....	6
2.3. CINÉTICA DE SECAGEM .....	7
2.3.1. INTRODUÇÃO.....	7
2.3.2. MODELOS MATEMÁTICOS .....	8
2.4. IMPORTÂNCIA DA SECAGEM NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO.....	10
2.4.1. INTRODUÇÃO.....	10
2.4.2. BETÃO.....	10
2.4.3. MADEIRA.....	11
2.5. PROCESSOS DE SECAGEM ASSOCIADOS A MANIFESTAÇÕES DE HUMIDADE .....	12
2.6. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE SECAGEM .....	15
2.7. ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO ÂMBITO DA SECAGEM EM MATERIAIS POROSOS.....	16
2.7.1. ESTUDOS REALIZADOS EM PORTUGAL .....	16
2.7.2. ESTUDOS REALIZADOS NO ESTRANGEIRO .....	17
2.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	17

<b>3. CARATERIZAÇÃO DO PROGRAMA TRHUMIDADE</b>	19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. MODELIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE NO TRHUMIDADE	19
3.2.1. MODELO TEÓRICO DE TRANSFERÊNCIA DE LUIKOV E PHILIP- DE- VRIES	19
3.2.1.1. LIMITAÇÕES E HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS DO MODELO	21
3.2.2. RESOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DE PHILIP- DE- VRIES E LUIKOV	21
3.3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	23
3.3.1. PROGRAMA PRINCIPAL E SUB-ROTINAS	23
3.3.1.1. ENTRADA DE DADOS	25
3.3.1.2. CONTRIBUIÇÃO DO EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR	26
3.3.1.3. INTERPOLAÇÃO DOS COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS	28
3.3.1.4. SAÍDA DE RESULTADOS	29
3.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO	30
<b>4. CARATERIZAÇÃO DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM</b>	31
4.1. INTRODUÇÃO	31
4.2. CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM ESTUDO	31
4.3. SIMULAÇÃO BASE	35
4.4. CARATERIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	36
4.4.1. HUMIDADE RELATIVA	36
4.4.2. TEMPERATURA	37
4.4.3. PRECIPITAÇÃO	38
4.4.4. RADIAÇÃO	40
4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO	41
<b>5. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM</b>	43
5.1. INTRODUÇÃO	43
5.2. HUMIDADE RELATIVA AMBIENTE	43
5.3. TEMPERATURA AMBIENTE	49
5.4. PRECIPITAÇÃO	54
5.5. RADIAÇÃO	58

<b>5.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>64</b>
---------------------------------------	-----------

<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
----------------------------	-----------

<b>6.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS .....</b>	<b>67</b>
--	-----------

<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>68</b>
--	-----------

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1- GUIA**

**ANEXO 2-** SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA HUMIDADE RELATIVA AMBIENTE NA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM

**ANEXO 3-** SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE NA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM

**ANEXO 4-** SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA PRECIPITAÇÃO NA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM

**ANEXO 5-** SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA RADIAÇÃO NA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Esquema representativo do processo de secagem num elemento construtivo .....	4
Fig. 2.2 – Porosidade aberta .....	4
Fig. 2.3 – Porosidade fechada.....	4
Fig. 2.4 – Representação dos tores de humidade de referência num material.....	5
Fig. 2.5 – Comportamento dos materiais higroscópicos em função da variação da humidade relativa..	6
Fig. 2.6 – Curvas caraterísticas da secagem em materiais .....	7
Fig. 2.7 – Betão no processo de cura .....	11
Fig. 2.8 – Secador de estufa estático .....	12
Fig. 2.9 – Humidade relativa devido a fenómenos de higroscopicidade num elemento construtivo.....	13
Fig. 2.10 – Altura atingida pela água nas paredes, em função das condições de evaporação .....	14
Fig. 2.11 – Secador por condução descontínuo- <i>Vacuum tray dryers</i> .....	16
Fig. 2.12 – Secador por convecção contínuo- <i>Rotary dryers</i> .....	16
Fig. 3.1 – Grelha tipo utilizada para aplicação do método das diferenças finitas .....	22
Fig. 3.2 – Organograma do programa TRHUMIDADE .....	24
Fig. 3.3 – Esquema do processo de computação para organização do sistema de equações .....	25
Fig. 3.4 – Introdução da radiação solar no programa de cálculo .....	28
Fig. 3.5 – Interpolação dos coeficientes fenomenológicos .....	28
Fig. 3.6 – Excerto do ficheiro de resultados, RTH, para a uma simulação em betão celular .....	29
Fig. 4.1 – Curva higroscópica do betão celular introduzida no TRHUMIDADE .....	33
Fig. 4.2 – Curva higroscópica do barro vermelho introduzida no TRHUMIDADE .....	33
Fig. 4.3 – Variação dos perfis do teor de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para a simulação base .....	36
Fig. 4.4 – Configuração das simulações a efetuar para a humidade relativa ambiente .....	37
Fig. 4.5 – Configuração das simulações a efetuar para a temperatura ambiente.....	38
Fig. 4.6 – Configuração das simulações a efetuar para a precipitação .....	39
Fig. 4.7 – Configuração das simulações a efetuar para a radiação .....	40
Fig. 5.1 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-HR e 4BV-HR .....	44
Fig. 5.2 – Representação da forma de cálculo para os valores representativos do teor de humidade total e da velocidade de secagem.....	45
Fig. 5.3 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, para as simulações efetuadas para as diferentes HR .....	45
Fig. 5.4 – Velocidade de secagem do barro vermelho em função das diferentes HR analisadas .....	46



Fig. 5.5 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 2BC-HR e 4BC-HR .....	47
Fig. 5.6 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para HR= 30% e HR= 70% .....	48
Fig. 5.7 – Velocidade de secagem do betão celular para HR= 30% e HR= 70% .....	48
Fig. 5.8 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-T e 6BV-T .....	50
Fig. 5.9 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, para as simulações efetuadas para diferentes temperaturas .....	51
Fig. 5.10 – Velocidade de secagem do barro vermelho em função da temperatura.....	51
Fig. 5.11 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 2BC-T e 6BC-T.....	52
Fig. 5.12 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para as simulações efetuadas respetivo às diferentes temperaturas .....	53
Fig. 5.13 – Velocidade de secagem do betão celular em função da temperatura .....	54
Fig. 5.14 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 1BV-P e 3BV-P .....	55
Fig. 5.15 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, para as simulações efetuadas para as simulações efetuadas para P= fraca e P= forte.....	55
Fig. 5.16 – Velocidade de secagem do barro vermelho em função da precipitação.....	56
Fig. 5.17 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 1BC-P e 3BC-P .....	57
Fig. 5.18 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para as simulações efetuadas para P= fraca e P= forte.....	58
Fig. 5.19 – Velocidade de secagem do betão celular em função da precipitação .....	58
Fig. 5.20 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-R e 4BV-R.....	59
Fig. 5.21 – Variação da temperatura ao longo do elemento construtivo na simulação 2BV-R e 4BV-R .....	60
Fig. 5.22 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, para as simulações efetuadas para as simulações 2BV-R e 4BV-R .....	60
Fig. 5.23 – Velocidade de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-R e 4BV-R .....	61
Fig. 5.24 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 2BC-P e 4BC-R .....	62
Fig. 5.25 – Variação da temperatura ao longo do elemento construtivo na simulação 2BC-R e 4BC-R .....	63
Fig. 5.26 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para as simulações de 25 (W/m <sup>2</sup> ) e 75 (W/m <sup>2</sup> ) .....	63

Fig. 5.27 – Velocidade de secagem do betão celular para as simulações 2BC-R e 4BC-R .....64



## **ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)**

Quadro 2.1 – Diferentes tipos de equipamentos de secagem .....	15
Quadro 4.1 – Propriedades do betão celular e do barro vermelho .....	32
Quadro 4.2 – Propriedades do betão celular dependentes do teor de humidade.....	34
Quadro 4.3 – Propriedades do barro vermelho dependentes do teor de humidade .....	34
Quadro 4.4 – Propriedades ambientais, teor de humidade inicial e temperatura inicial da parede .....	35
Quadro 4.5 – Descrição das simulações a efetuar para a humidade relativa.....	37
Quadro 4.6 – Descrição das simulações a efetuar para a temperatura .....	38
Quadro 4.7 – Representação horária da precipitação de intensidade fraca.....	39
Quadro 4.8 – Representação horária da precipitação de intensidade média .....	39
Quadro 4.9 – Representação horária da precipitação de intensidade forte.....	40
Quadro 4.10 – Descrição das simulações a efetuar para a precipitação .....	40
Quadro 4.11 – Descrição das simulações a efetuar para a radiação.....	41



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$U$	[kg/kg]	Teor de humidade
$U_h$	[kg/kg]	Teor de humidade higroscópico
$U_{cr}$	[kg/kg]	Teor de humidade critico
$U_{sat}$	[kg/kg]	Teor de humidade de saturação
$U_{max}$	[kg/kg]	Teor de humidade máximo
$HR$	[%]	Humidade relativa
$W$	[kg/kg]	Teor de humidade
$RW$	[-]	Razão de humidade
$t$	[s]	Tempo
$h$	[W/m <sup>2</sup> .°C]	Coeficiente de transferência de calor
$H$	[m]	Altura
$\rho_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade do material i
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade da água
$m_{ic}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de fluxo de massa transportado por condução
$m_{id}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de fluxo de massa transportado por convecção
$q$	[J/m <sup>2</sup> .s]	Densidade de fluxo de calor transportado por condução
$M$	[kg/m <sup>3</sup> .s]	Termo que traduz a condensação
$h_i$	[J.m <sup>3</sup> /kg]	Entalpia mássica do material i
$h_w$	[J.m <sup>3</sup> /kg]	Entalpia mássica da água
$\Psi_i$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade total do material
$T$	[°C]	Temperatura
$D_w$	[m <sup>2</sup> /s]	Difusividade higríca
$D_t$	[m <sup>2</sup> /s.K]	Difusividade higrótérmica
$\rho^*$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade equivalente
$C^*$	[J/kg.K]	Calor específico equivalente
$\lambda^*$	[W/m.K]	Condutibilidade térmica aparente
$\beta$	[m/s]	Coeficiente de transferência superficial de humidade

$PS$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Pressão de saturação
$q$	$[\text{W}/\text{m}^3]$	Fluxo de calor
$K$	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$	Coeficiente de transferência térmica
$he$	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$	Condutância térmica superficial
$R_{term}$	$[(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}]$	Resistência térmica
$\rho_0$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Massa volúmica seca do material
$C_0$	$[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	Calor específico do material seco
$\xi$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	Porosidade
$\lambda$	$[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$	Condutibilidade térmica
$S$	$[\text{Pa}]$	Sucção capilar
$R$	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Radiação

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Os materiais de construção correntemente utilizados na construção são de carater poroso, portanto são materiais que possuem elevada capacidade para reter líquidos no seu interior. A ocorrência de muitas das patologias associadas à construção deve-se à presença da água.

A secagem é um processo de transferência de massa complexo no qual ocorrem mudanças a nível estrutural e físico-químicas. Os danos causados durante o processo de secagem podem originar mais danos nos materiais que o processo de absorção.

Tendo em conta as implicações referidas, às dificuldades inerentes ao estudo do processo de secagem e ao incremento da complexidade das paredes, é de extrema relevância o estudo contínuo do processo de secagem.

A secagem também tem um papel importante na formação de materiais que poderão ser utilizados como elementos na construção. A título de exemplo destaca-se a cura do betão e o tratamento da madeira através da secagem natural ou artificial.

Tendo em conta o crescente papel da secagem e considerando que a simulação numérica do desempenho higrotérmico de elementos que constituem os edifícios tem vindo a assumir um papel cada vez mais preponderante, considerou-se pertinente a utilização do programa TRHUMIDADE, programa de simulação numérica, para analisar a sensibilidade que vários parâmetros ambientais têm no processo de secagem.

### 1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é estudar o fenómeno de secagem em materiais de construção porosos através do programa de simulação numérica TRHUMIDADE.

Para que tal fosse possível foi necessário numa primeira fase estudar o processo de secagem de forma a interpretar de que forma se desenvolve em materiais porosas. A segunda fase passou pelo estudo do funcionamento do programa TRHUMIDADE, para além desta fase ser importante para um correto manuseamento também é fundamental interpretar as potencialidades e limitações que o programa tem.

Após o estudo do TRHUMIDADE foi necessário criar uma simulação base para posteriormente fazer variar vários parâmetros ambientais alvo de estudo para o processo de secagem. Com os resultados obtidos pelo TRHUMIDADE houve a necessidade de proceder a um tratamento estatístico auxiliar para



analisar com maior detalhe a sensibilidade que o processo de secagem tem para cada um dos parâmetros em análise.

Numa ultima fase procedeu-se à análise de resultados obtidos, principalmente através da comparando perfis do teor de humidade, velocidade de secagem e dos valores representativos do teor de humidade total.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos:

- O primeiro capítulo diz respeito à apresentação do tema, âmbito, objetivos e a organização estrutural da dissertação.
- O segundo capítulo diz respeito aos fundamentos da secagem. Neste capítulo é explicado de forma sintetizada em que consiste a secagem, a definição de vários parâmetros relevantes no processo de secagem, o processo de secagem característico de materiais porosos, a cinética de secagem a importância da secagem na indústria da construção, processos de secagem associados a manifestações de humidade, métodos e equipamentos de secagem e estudos desenvolvidos no âmbito da secagem.
- No terceiro capítulo é caracterizado o programa TRHUMIDADE. É apresentado o modelo que está na sua base e posteriormente é descrito o funcionamento do programa.
- O quarto capítulo teve como objetivo caracterizar o estudo de sensibilidade do processo de secagem, como tal, numa primeira fase, houve a necessidade de caracterizar os materiais para se proceder à introdução das suas propriedades no TRHUMIDADE. Posteriormente criou-se uma simulação base, para tal houve a necessidade de se criar uma simulação em ambiente laboratorial. Na última fase é caracterizado as simulações numéricas a efetuar.
- O capítulo 5 diz respeito ao estudo de sensibilidade das condições fronteira no processo de secagem, a partir das simulações descritas no capítulo quatro.
- O capítulo 6 diz respeito às conclusões. Este capítulo contém as principais conclusões relativas ao estudo da sensibilidade do processo de secagem face à variação das condições fronteira, como também contém as principais conclusões e desenvolvimentos futuros.

# 2

## FUNDAMENTOS DA SECAGEM

### 2.1. INTRODUÇÃO

Os materiais de construção, estão expostos ao contacto com água no estado líquido, principalmente devido à precipitação. O papel da água no processo de deterioração dos materiais construtivos, que na sua maioria são porosos, tem sido reconhecido há já algum tempo, propiciando a ocorrência de destacamentos, empolamentos, expansões, condensações, manchas entre outras formas [1],[2]. A durabilidade das infraestruturas está intrinsecamente ligado à forma como a água se infiltra e se movimenta nos poros dos materiais que a constituem [1].

A secagem é um processo de transferência de massa complexo no qual ocorrem mudanças a nível estrutural e físico-químicas no interior dos materiais. Relativamente a danos causados nos materiais de construção, em comparação com o processo de absorção, é durante este processo que podem ocorrer mais danos nos materiais [3].

Devido às implicações referidas anteriormente, às dificuldades inerentes ao estudo do processo de secagem e ao incremento da complexidade da composição das paredes, é de extrema relevância o estudo continuo deste processo no sector da construção.

### 2.2. MECANISMOS DE SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS

#### 2.2.1. DEFINIÇÃO DE SECAGEM

O processo de secagem consiste na remoção de um líquido de um sólido com a finalidade de produzir um produto sólido através da entrada de energia, maioritariamente sobre a forma de calor [4]. Neste sentido este processo consiste em dois tipos de transferência: energia introduzida no material e massa, que diz respeito à saída de água.

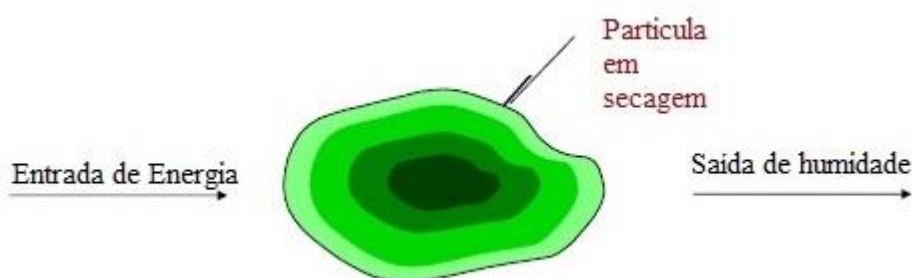


Figura 2.1- Esquema representativo do processo de secagem num elemento construtivo

A transferência de energia, sob a forma de calor, pode ser por condução, por convecção ou por radiação e a saída de humidade pode ocorrer por difusão de vapor, fluxo capilar, difusão líquida, difusão de Knudsen, fluxo Poiseuille ou pela combinação das formas de saída referidas.

Sendo o processo de secagem bastante complexo, existem alguns fatores que podem explicar essa complexidade [5]:

- Entrada de energia constante ou intermitente;
- Mudança de fase;
- Transporte de humidade de várias componentes;
- Transferência de massa;
- Reações químicas e bioquímicas;
- Retrações e expansões dos elementos;
- Degradação do elemento;

## 2.2.2. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES PARA O ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM

### 2.2.2.1. POROSIDADE

A porosidade de um material é definida segundo a razão entre o volume total de vazios (poros e canais) e o volume total aparente[6]. A generalidade dos materiais utilizados na construção é considerado a nível microscópico como porosos, um exemplo de um material não poroso é o vidro.



Figura 2.2- Porosidade aberta



Figura 2.3- Porosidade fechada

A maioria dos materiais de construção porosos apresentam uma porosidade aberta, como representado na figura 2.2, estes canais comunicam entre si e com a superfície, os restantes apresentam porosidade fechada, figura 2.3, neste caso os poros não se comunicam entre si. A transferência de água nos materiais de porosidade aberta é mais rápida que nos materiais de porosidade fechada[6].

#### 2.2.2.2. TEOR DE HUMIDADE

De uma forma sintetizada o teor de humidade pode ser definido como a quantidade de água que determinado material apresenta nos três estados. Na figura 2.4, estão representados os diferentes domínios que o teor de humidade de um material pode pertencer.

0	Uh	Ucr	Usat Umáx
Secagem artificial	Domínio Higroscópico	Domínio capilar	Humidificação sob pressão

Figura 2.4- Representação dos teores de humidade de referência num material[6]

Os domínios representados na figura 2.4 são delimitados pelos seguintes teores de humidade[6]:

- **Uh- Teor de humidade higroscópico-** teor de humidade que um material contém quando em contato com uma ambiência com determinada humidade relativa, pode atingir o zero absoluto no caso de o material esteja sujeito a uma ambiência com uma humidade relativa nula.
- **Ucr- Teor de humidade crítico-** corresponde à quantidade de água que um material contém quando sujeito a uma ambiência saturada, teoricamente  $HR=100\%$ , quando estamos perante valores superiores o transporte de água é feito praticamente apenas por capilaridade.
- **Usat- Teor de humidade de saturação-** corresponde à quantidade de água que um dado material contém quando em contato com água por um determinado período de tempo.
- **Umáx- Teor de humidade máximo-** é a quantidade de água que o material apresenta quando está repleto de água com a exceção do esqueleto sólido. Este valor dificilmente é tangível pois existe ar aprisionado no respetivo material.

#### 2.2.2.3. HIGROSCOPICIDADE

De uma forma sintetizada podemos afirmar que a humidade higroscópica pode ser descrita como a capacidade que um dado material tem de fixar água por absorção e a devolver à sua ambiência em função da variação da humidade relativa a que está sujeito.[6]

A maioria dos materiais de construção são higroscópicos, consequentemente o seu teor de humidade irá variar em concordância com as variações da humidade relativa. Este fenómeno é dado às forças intermoleculares de *Van der Waals*, pode ser representado pelo gráfico presente na figura 2.5[7].

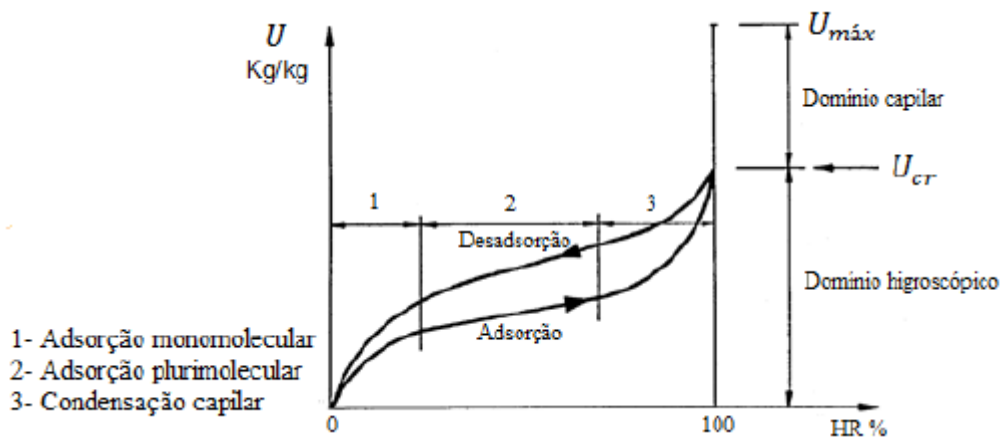


Figura 2.5- Comportamento dos materiais higroscópicos em função da variação da HR

Na figura 2.5 o processo de absorção está dividido por 3 fases distintas. A primeira fase, correspondente a baixos valores da HR, corresponde à absorção monomolecular, ocorrendo a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros. Quando estas ficam cobertas por moléculas de água inicia-se a absorção plurimolecular, ocorre a sobreposição de novas camadas. Com a crescente deposição de camadas de moléculas de água o diâmetro dos poros irá diminuir conduzindo à junção de todas as camadas plurimoleculares, provocando a condensação capilar.[6]

Ainda na figura 2.5 é possível distinguir a diferença entre o comportamento dos materiais quando sujeito a absorção e a desabsorção, este fenómeno designa-se por *histereses*[7].

### 2.2.3. PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS

A maioria dos materiais de construção utilizados na construção são porosos e apresentam um comportamento higroscópico. A secagem natural destes materiais ocorre até estes atingirem uma humidade de equilíbrio em função da humidade relativa da envolvente onde decorre a secagem. A partir deste teor de humidade, só é possível continuar com a secagem do material por meios artificiais (centrifugação, vácuo, estufa, etc.)[8].

Segundo Krischer[9], quando um determinado material se encontra saturado e é colocado numa ambiência na qual a temperatura e a humidade são constantes, pode-se considerar a ocorrência de três fases de secagem com distintas velocidades características.

Como é possível averiguar pela figura 2.6., a primeira fase corresponde a um fluxo de secagem constante. Nesta fase o transporte da água líquida, no material saturado, é efetivado no sentido do interior do material para a superfície em contato com a ambiência, através das forças capilares. A quantidade de água no estado líquido transportado para a superfície é superior à quantidade de água libertada através da evaporação [8].

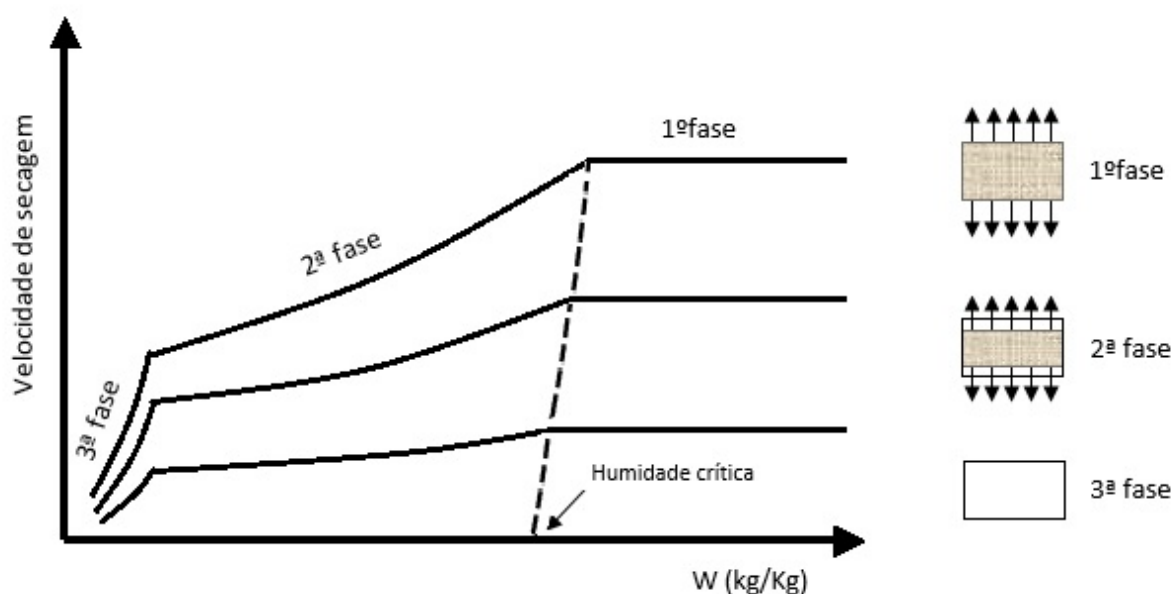


Figura 2.6- Curvas características da secagem de diferentes materiais [7]

A segunda fase inicia a partir do momento em que a quantidade de água que o material liberta sobre a forma de vapor é superior à quantidade de água no estado líquido transportada para a superfície do respetivo material. A frente húmida vai deslocar-se no sentido do interior do material, sendo que a secagem passa a realizar-se por difusão a partir da frente húmida, aumentando a camada seca e consequentemente diminuindo o fluxo de secagem. Nesta fase uma parte do material a secar encontra-se no domínio higroscópico enquanto a restante se encontra no domínio capilar [8][7].

A terceira, e última fase, ocorre quando se dá o equilíbrio higroscópico, verifica-se quando os teores de humidade são, em qualquer ponto do interior do material, inferiores ao teor de humidade crítico. O fluxo de secagem tende para zero, como representado na figura 2.6. Esta fase do processo ocorre num ritmo bastante lento, podendo demorar até vários anos [7][8].

É importante referir que as curvas características representadas na figura 2.6. são curvas usadas como referência, cada material possui a sua própria, podendo variar com as condições de secagem como também devido às características intrínsecas a cada material.

## 2.3. CINÉTICA DA SECAGEM

### 2.3.1. INTRODUÇÃO

Como foi referido anteriormente a secagem é um processo de transferência de massa complexo no qual ocorrem mudanças a nível estrutural e físico-químicas no interior dos materiais, sendo um dos fatores mais preponderantes no processo de deterioração dos materiais de construção [3][10].

Tendo em consideração todos estes fatores torna-se essencial o estudo da cinética da secagem, permitindo assim relacionar os fatores externos com a humidade existente nos materiais.

Os fatores externos aos quais tem sido dado maior relevância nos diversos estudos relativos à cinética de secagem são a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar. Em outros estudos têm sido abordadas outras variáveis, tais como as características e o tipo de material e o tempo de secagem. O

principal foco destes estudos centra-se na otimização do tempo de secagem, reduzindo os respetivos tempos de secagem dos materiais como também os custos associados, através do incremento da produtividade dos equipamentos e da redução do consumo de energia, melhorando assim a qualidade do produto final [11].

Para o estudo da secagem são utilizados modelos de camada fina que presume a existência de uma camada de material suficientemente fina para que as condições externas sejam constantes no material durante o respetivo processo, como também uma resistência ao fluxo de humidade uniformemente distribuída ao longo do material homogéneo e isotrópico. Estes modelos são distribuídos em três grupos, os modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos [12][13].

Os modelos teóricos descrevem o processo de secagem a partir de equações gerais de secagem, utilizando métodos analíticos ou teóricos. Estes modelos têm como base a lei de Fick, sendo o fluxo de massa por unidade de área proporcional ao gradiente de concentração de água [14][15]. A principal diferença entre este modelo e os restantes centra-se no facto dos modelos teóricos terem em consideração as resistências internas ao fluxo de humidade, enquanto as restantes refletem resistências à transferência de humidade entre o material e o ar. É importante destacar que para o desenvolvimento da presente dissertação, o modelo que está na base do programa, TRHUMIDADE, utilizado posteriormente neste trabalho de dissertação, é um modelo teórico desenvolvido por *Philip -De Vries*.

Nos modelos empíricos é necessário obter valores experimentais para poder desenvolver uma equação em função dos resultados obtidos. Este modelo têm o inconveniente de os resultados da relação entre o tempo de secagem e o teor médio de secagem de um material, não ter em consideração as várias variáveis que estão implícitas num processo de secagem, isto é, os valores obtidos, na maioria dos casos, são válidos apenas para as circunstâncias em que ocorre o processo de secagem, por exemplo: a temperatura do ar, a humidade relativa, velocidade do ar (principais fatores externos do parâmetro de secagem). O objetivo principal deste tipo de modelos é encontrar uma relação entre os valores experimentais e as curvas obtidas nos restantes modelos.

Os modelos semi-teóricos, na generalidade, resultam de simplificações da segunda lei de Fick ou da modificação de outros modelos simplificados e válidos segundo os limites de temperatura, velocidade do ar, humidade relativa, e quantidade de água limiar para os quais foram desenvolvidos[13]. Estes modelos, em alguns casos, têm a adição de coeficientes empíricos, obtidos experimentalmente, por forma a obter uma melhor relação entre a curva de secagem e os dados experimentais. A principal limitação é o facto destes modelos considerarem um coeficiente de difusão constante, por simplificação, quando na verdade não representa o modelo físico do processo de secagem.

Para aplicar estes modelos pressupõem-se que as condições onde se processa a secagem sejam isotérmicas, logo a temperatura seja constante e que a resistência à transferência de humidade esteja condicionada pela superfície do material em secagem [14].

### 2.3.2. MODELOS MATEMÁTICOS

Na maioria dos materiais, principalmente os que têm uma estrutura porosa estável, o processo de secagem em função do tempo pode ser traduzido por equações de cinética de primeira ou segunda ordem [16].

- Modelo de Page[17],[18]

$$RW = \exp(-k \times t^n) \quad (1.1)$$

- Modelo de Page (Modificado)[18]

$$RW = \exp[-(-k \times t^n)] \quad (1.2)$$

- Modelo de Henderson e Pabis[18],[19]

$$RW = a \times \exp(-k \times t) \quad (1.3)$$

- Modelo de Henderson e Pabis (Modificado)[17]

$$RW = a \times \exp(-k \times t) + b \exp(-k_0 \times t) + c \times \exp(-k_1 \times t) \quad (1.4)$$

- Modelo de Dois termos[17]

$$RW = a \times \exp(-k_0 \times t) + b \times \exp(-k_1 \times t) \quad (1.5)$$

- Modelo de Newton/ Lewis[17][18]

$$RW = \exp(-k \times t) \quad (1.6)$$

Em que:

$RW$	- Razão de humidade	[-]
$t$	- Tempo de secagem	[s]
$k_0, k, k_1$	- Constantes de secagem	[s <sup>-1</sup> ]
$a, b, c, n$	- Coeficientes dos modelos	[-]

Para cada estudo será sempre necessário escolher a equação da cinética de secagem que melhor se ajusta aos dados experimentais. Para tal, na literatura, existem vários parâmetros que permitem escolher qual a equação que melhor se ajusta para o estudo da cinética de secagem de um dado material.

Num trabalho recentemente desenvolvido por Eva Barreira[3], o ajuste do modelo aos resultados experimentais foi obtido através da menor soma das percentagens de desvio entre os dados experimentais e os teóricos ao longo do tempo. Outra forma de seleção do modelo mais adequado é determinando o coeficiente de regressão ( $R^2$ ). Este coeficiente é determinado a partir das somas dos erros ao quadrado entre experimental e teórico (SSE) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE). A posterior seleção é efetivada através do maior valor de  $R^2$ , do menor valor de SSE e do menor valor do RMSE [20].

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (RW_{teo,i} - RW_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RW_{teo} - RW_{exp,i})^2} \right] \quad (1.7)$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^n (RW_{exp,i} - RW_{teo,i})^2}{N} \quad (1.8)$$



$$RMSE = [\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (RW_{exp,i} - RW_{teo,i})]^2 \quad (1.9)$$

## 2.4. IMPORTÂNCIA DA SECAGEM NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

### 2.4.1. INTRODUÇÃO

Na indústria de construção o estudo do processo de secagem tem uma significativa relevância devido ao facto de muitos dos materiais utilizados sofrerem este processo, tanto para serem fabricados como posteriormente devido à possível humificação.

Neste capítulo são descritos alguns materiais (betão e madeira) sujeitos a este processo que os torna exequíveis à sua utilização em obra, como também patologias associadas à presença de humidade em materiais de construção.

### 2.4.2. BETÃO

O betão é composto pela junção de vários elementos, um ligante hidráulico (p.e. cimento), agregados (grossos e finos), água e eventualmente adjuvantes, resultando do endurecimento da pasta de cimento [21].

No processo de cura do betão dever-se-á criar condições para que as reações de endurecimento ocorram o mais plenamente possível de forma a minimizar a retração plástica e assegurar o desenvolvimento das características intrínsecas ao tipo de betão pretendido. A secagem natural está perante fatores que poderão ser prejudiciais a uma boa cura, tais como grandes variações de temperatura (p.e., devido ao calor de hidratação ou temperaturas exteriores muito baixas) ou devido a fatores externos (temperaturas elevadas, vento) que poderão provocar a secagem prematura à superfície [22].

No caso da superfície do betão secar prematuramente durante a cura, as reações de hidratação são impedidas, a segmentação capilar não se dá e a permeabilidade da camada do betão pode vir a ser até cinco a dez vezes superior ao betão bem curado. Após a ocorrência da secagem superficial não existem medidas eficazes para que sejam retomadas as reações de hidratação [23].

É importante mencionar que quanto mais tempo de cura e mais eficaz a sua proteção, melhor serão as propriedades do betão: maior permeabilidade, tensão de rotura, resistência ao desgaste e a ataques químicos. Porém na prática não é fácil conciliar a vertente económica e a de qualidade.[22]

Tendo em consideração todos estes fatores, o processo de secagem do betão é de extrema relevância durante o seu fabrico, consequentemente durante o processo de cura, com especial atenção ao respetivo controlo e proteção.

Na figura 2.7 apresenta-se um exemplo de betão sujeito ao processo de secagem.



Figura 2.7- Betão sujeito ao processo de embebição e ao processo de cura[24].

#### 2.4.3. MADEIRA

A madeira foi durante muito tempo o principal material utilizado na construção. Nos finais do século XIX verificou-se uma maior necessidade de fabricar estruturas mais arrojadas e há estagnação do processo evolutivo a nível técnico da madeira. Aliado a este fator, o aparecimento do aço, com perfis de formas e dimensões extremamente variadas, possibilitou a realização de novas e mais arrojadas estruturas, acompanhando o desenvolvimento industrial, estes fatores provocaram um declínio da utilização da madeira como material construtivo. Esta crise ainda se agravou mais com o progresso do betão armado [25].

Mais recentemente verifica-se uma nova tendência para a reutilização da madeira como o principal material na construção. Nos dias correntes já existem há disposição técnicas que asseguram que a madeira possua características mais próximas das do aço [26]. Em vários países como a Noruega, Canadá e Nova Zelândia é mesmo o principal material de construção. Tendo em conta estes fatores e o facto de a madeira ser um material poroso que no seu estado natural possui uma quantidade considerável de água, torna-se então indispensável o estudo do fenómeno de secagem.

Segundo Galvão & Jankowsky (1985) [27] e Ponce & Watai (1985) [28], a madeira, depois do processo de secagem, terá entre outras as seguintes vantagens e ou objetivos na construção:

- Redução do peso da madeira, acarretando menores custos no transporte;
- Maior resistência à proliferação de insetos e fungos;
- As contrações decorrentes da diminuição do teor de humidade, ocorrem antes do processamento da madeira, permitindo uma maior precisão dimensional ao produto final, evitando defeitos como deformações, empenamentos e o aparecimento de fendas;

- As propriedades mecânicas da madeira, maioritariamente, são aumentadas, tais como a resistência à flexão e compressão.

É importante ter em consideração a importância que o processo de secagem tem para a utilização da madeira como material de construção. Nos dias correntes, além da secagem natural (madeira exposta ao ar livre), existem outras técnicas de secagem artificial (figura 2.8) que permitem que este processo seja mais célere, como também atingir teores de humidade inferiores aos da secagem natural, como também existem processos que conjugam os dois tipos de secagem anteriormente mencionados.



Figura 2.8- Secador de estufa estática

## **2.5. PROCESSOS DE SECAGEM ASSOCIADOS A MANIFESTAÇÕES DA HUMIDADE**

É de extrema relevância, na fase de projeto, prever quais as possíveis manifestações da humidade que poderão ocorrer para que seja possível tomar medidas preventivas para que não ocorram determinadas anomalias. Para tal é de extrema relevância o conhecimento das formas de manifestação de humidade.

É importante conhecer as formas de manifestação da humidade por forma a facilitar um eficiente e correto diagnóstico para a respetiva reparação. Por forma a facilitar a identificação e atribuição de causas à presença de humidade, existem seis grupos principais de formas de manifestação principais, na qual para cada tipo, por norma correspondem a um conjunto bem definido de sintomas [29][30]:

- a) Humidade de construção;
- b) Humidade ascensional;
- c) Humidade de precipitação;
- d) Humidade de condensação;
- e) Humidade devido a fenómenos de higroscopicidade;
- f) Humidade devido a causas fortuitas;

No estudo do processo de secagem associado às diferentes formas de manifestação de humidades é importante realçar que poderão ocorrer manifestações de humidade sem que haja necessidade de proceder a qualquer tipo de prevenção ou reparação, pois a presença de humidade nem sempre representa uma ameaça ao correto funcionamento da estrutura como também pode não apresentar sintomas esteticamente desagradáveis.

O processo de secagem associado às diferentes formas de humidade pode ser bastante diferente e em muitos casos devem ser analisados por forma a evitar ainda em fase de projeto e outros devem ser analisados em tipos específicos de edificações por lhes serem caraterísticos.

Por exemplo, a humidade devido a fenómenos de higroscopicidade, deve ser estudada tendo em consideração a constituição dos elementos construtivos relativamente à presença e a quantidade de sais em função dos valores da humidade relativa a que estão expostos, principalmente quando existem sulfatos, carbonos, cloretos e ou nitritos.

Uma grande parte dos materiais utilizados na indústria da construção apresentam na sua constituição sais solúveis em água. Apesar de em circunstâncias correntes a existência destes sais não ser gravosa, quando sujeitos à humedificação, os sais dissolvidos irão acompanhar as migrações da água até à superfície onde irão cristalizar sob a forma de eflorescências ou cripto florescências. Alguns destes sais são higroscópicos, pois possuem a capacidade de absorver a humidade do ar dissolvendo-se, quando sujeitos a uma humidade relativa acima de valores entre 65% a 75%, estes voltam a cristalizar com um notável incremento de volume quando a humidade relativa baixa dos valores referidos anteriormente. Devido a este fator, para além da humedificação das superfícies, a presença destes sais também poderá provocar degradação inerentes ao facto do aumento de volume acompanhado da cristalização, agravados se estiverem expostos a vários ciclos de dissolução-cristalização num determinado período de tempo [29].

O processo de secagem desta forma de humidade está associado às variações da humidade relativa que o elemento em questão está exposto, se o elemento estiver exposto a vários ciclos cujo a humidade relativa é muito variável, ocorrerão vários ciclos de humedificação e secagem, sem que haja o desaparecimento dos sais. Por norma os teores de humidade são constantes em altura e decrescentes acentuadamente do interior para o exterior, figura 2.9.

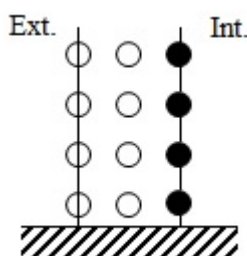


Figura 2.9- Humidade devido a fenómenos de higroscopicidade num elemento construtivo

Já o processo de secagem associado à humidade ascensional deve ser analisado para edificações antigas pelo facto de hoje em dia já haver mecanismos que evitam a sua ocorrência.

Esta forma de humidade é provocada pela absorção de água proveniente do solo, devido à porosidade característica dos materiais de construção que conduz a uma capilaridade elevada, quando aliados à ausência de qualquer tipo de barreiras estanques, possibilitando assim a migração da água por ascensão capilar [6].

O nível máximo atingido pela frente húmida dar-se-á quando ocorrer o equilíbrio entre a água evaporada através da superfície do material e a água absorvida pelo solo. É devido a este fenómeno que quando são reduzidas as condições de evaporação, quer por exemplo devido a fatores climáticos a que as paredes humedecidas estão sujeitas ou até pela colocação de um revestimento impermeável (figura 2.10), a altura da água terá tendência a aumentar até que atinja um novo ponto de equilíbrio.

Também a presença de sais no terreno e como referido anteriormente, nos materiais, pode agravar as condições de evaporação e assim aumentar a altura da ascensão capilar. Isto prende-se ao facto de que os sais irão cristalizar em níveis mais elevados e assim ocupar um maior volume de poros e consequentemente originando uma nova altura da ascensão capilar [29][30].

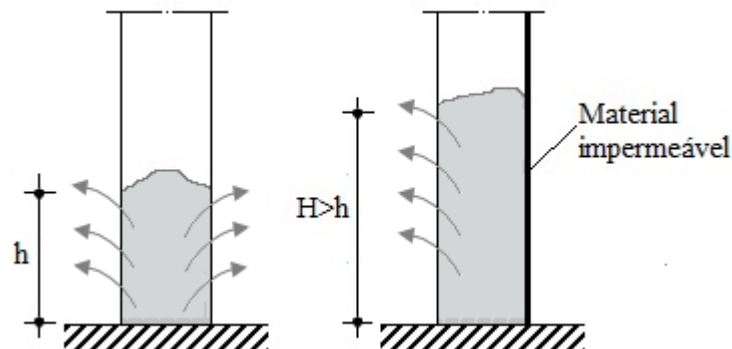


Figura 2.10- Altura atingida pela água nas paredes, em função das condições de evaporação

A humidade de condensação é uma das formas de humidade mais comuns em edifícios habitacionais.

A máxima quantidade de vapor de água que o ar pode conter, para uma determinada temperatura, corresponde ao limite de saturação, e irá variar em função da temperatura, aumentando com o aumento desta. Tendo em conta este facto, a ocorrência de condensações dependem do arrefecimento de uma massa de ar, no caso de esta atingir a temperatura de saturação ou temperatura ponto de orvalho [30].

A humidade de condensação divide-se em dois tipos fundamentais, as condensações superficiais e as condensações internas.

Relativamente às humidades superficiais o processo de secagem, genericamente, é bastante simples e desenvolve-se com o aumento da temperatura ambiente. Este tipo de humidade pode ser evitável com o aumento do isolamento térmico, aumento da temperatura ambiente e uma maior ventilação por forma a diminuir a humidade relativa.

Uma parte do excesso de humidade no interior dos edifícios pode ser transportada para o exterior através das paredes, atravessando-as por difusão. Se neste percurso houver um ponto em que a pressão parcial do vapor de água iguale a pressão de saturação para a respetiva temperatura, então nesse ponto irão ocorrer condensações internas [30].

A ocorrência de condensações internas nem sempre é prejudicial e em muitos casos, principalmente quando ocorrerem pequenos períodos resultando pequena quantidade de água condensada, esta irá permanecer no interior do material. Quando perante níveis de condensação superiores a secagem irá progredir das faces do elemento para o interior, sendo que o tempo de secagem estará dependente de fatores ambientais e de características do próprio elemento.

## 2.6. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE SECAGEM

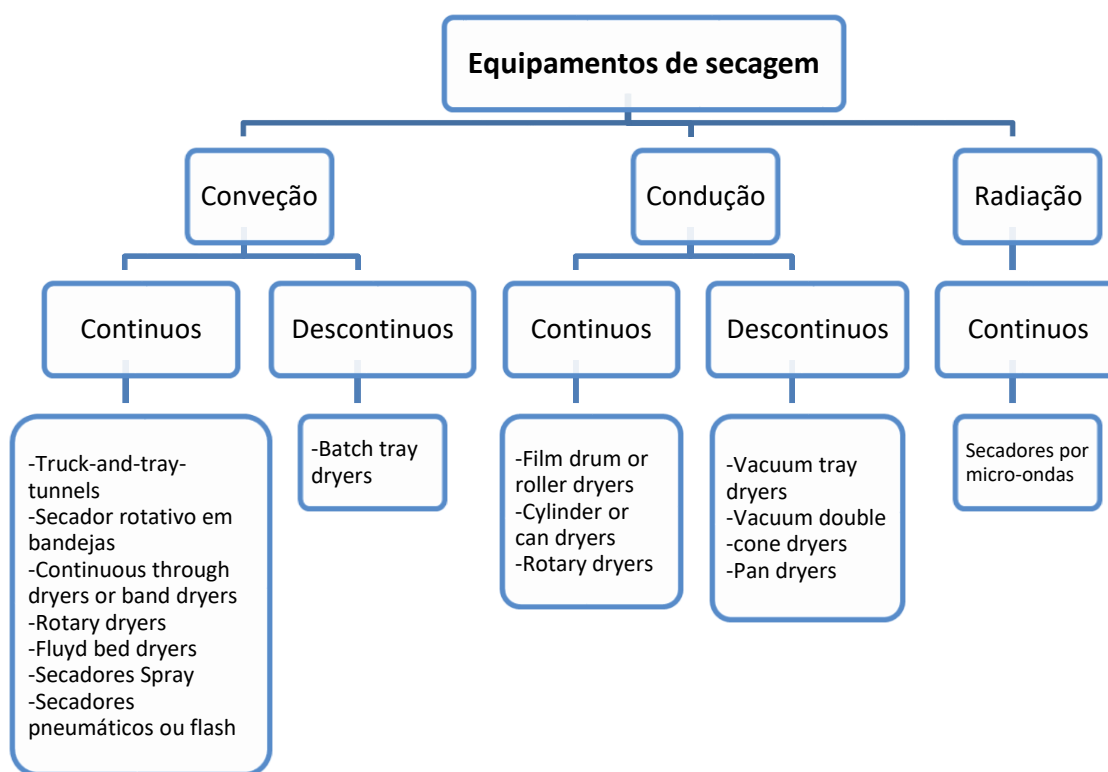
Uma vez que é necessário a utilização de equipamentos de secagem, torna-se necessário seleccionar qual o método e o equipamento mais ajustado à circunstância. Esta seleção nem sempre é fácil, não é uma ciência exata e a sua seleção tem sido baseada sobretudo em experiências anteriores.

Esta tarefa tem vindo a ser ainda mais dificultada pela introdução de mais equipamentos no mercado como também devido ao fato de ter de obedecer a determinados parâmetros, tais como: restrições ambientais; altas percentagens de produção; restrições de qualidade e otimização de custos. [5]

Por norma os secadores dividem-se em dois tipos fundamentais, os contínuos e os descontínuos, e para cada um destes tipos podem funcionar através das diferentes formas de transferência de calor, a convecção, a condução e a radiação.[31]

No esquema 1 estão representados alguns dos equipamentos de secagem presentes no mercado relativamente às suas características.

Quadro 2.1- Diferentes tipos de equipamentos de secagem



Nas figuras seguintes apresentam-se dois exemplos de equipamentos de secagem existentes.





Figura 2.6- Secador por condução descontínuo- *Vacuum tray dryers*[32].



Figura 2.6- Secador por convecção contínuo- *Rotary dryers*[33]

## 2.7. ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO ÂMBITO DA SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS

### 2.7.1. ESTUDOS REALIZADOS EM PORTUGAL

Os estudos da secagem em materiais porosos em Portugal já têm vindo a ser estudado há algum tempo devido aos seus impactes negativos na construção civil em Portugal.

Na Faculdade de Engenharia do Porto, V. Freitas [7], desenvolveu um programa denominado por TRHUMIDADE, que determina por simulação os perfis do teor de humidade e de temperatura no interior de materiais de construção. Este programa será descrito com mais pormenor no capítulo X.

Para além do programa, V. Freitas, instalou o Laboratório de Física das Construções um dispositivo de medição de humidade por raios gama, procedendo à avaliação da existência de um espaço de ar entre camadas e da influência da interface entre camadas. Também determinou os perfis dos teores de

humidade e da velocidade de secagem do betão do celular, através de secagem natural em provetes de betão celular secando por duas faces em condições isotérmicas.

Também a nível experimental, V.Freitas et al [3] procederam à avaliação da cinética de secagem do tijolo cerâmico, com a finalidade de avaliarem a secagem de materiais de construção porosos, principalmente o tijolo maciço.

Guimarães, A. S., Freitas V. P., Delgado J. M. P. Q., Rego, no âmbito da 6th *International Building Physics Conference, IBPC 2015*[1], aprofundaram o tema do efeito da interface na absorção de água no tijolo cerâmico, através de experiências laboratoriais.

J. Castro[8], determinou os teores de humidade e os fluxos de secagem, por atenuação de raios gama ,para o betão celular

Foi desenvolvido por Branco et al[34], um artigo que contribui para a sistematização do conhecimento acerca e argamassas de regularização. Este artigo contém a descrição de um trabalho laboratorial onde é comparado o processo de secagem natural e em estufa para iferentes argamassas leves.

#### 2.7.2. ESTUDOS REALIZADOS NO ESTRANGEIRO

No estrangeiro diversos estudos foram efetuados, porem o principal objetivo na maioria desses estudos é basicamente associar a um determinado material o modelo de secagem matemático mais adequado. Estes estudos recorrem fundamentalmente ao procedimento de ensaios experimentais e posteriormente comparando-os com os modelos de cinética de secagem que melhor se associam.

No entanto podemos enumerar diversos estudos que não pertencem a este núcleo, e desenvolvem estudos relacionados com a cinética da secagem. Por exemplo L. Pel[35], desenvolveu um estudo relativo ao transporte de humidade em materiais de construção porosos.

Moropoulou et al[36], testaram o efeito face a diferentes condições ambiente de secagem, como a temperatura ambiente, humidade relativa e o vento para vários materiais de construção. Neste estudo foi desenvolvido um modelo de secagem que permite prever os tempos de secagem de materiais de construção.

Krus e Holme[37], fizeram um estudo com o intuito de comparar o coeficiente de transporte liquido, na fase de absorção e desabsorção, para criar um método capaz de calcular esses coeficientes. Conseguiram desenvolver um método que permite estimar os coeficientes de absorção, tais como a capilaridade de saturação livre, teor de humidade e coeficiente de absorção de água.



## **2.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO**

Neste capítulo foram introduzidos os aspetos fundamentais da secagem, como tal foram apresentadas as seguintes informações:

- O processo de secagem consiste na remoção de um líquido que se encontra num sólido através da entrada de energia, que pode ser sob a forma de calor, condução e convecção.
- O processo de secagem de materiais porosos com comportamento higroscópico apresenta três fases de secagem, a primeira fase mais célere e constante, feita maioritariamente por capilaridade, a segunda fase quando o material se encontra simultaneamente no domínio capilar e higroscópico, fazendo-se uma parte da secagem através de vapor e a terceira fase, a mais lenta do processo e tende para valores nulos pois a transferência de água ocorre através vapor.
- Existem vários modelos que descrevem o processo de secagem. São agrupados em modelos teóricos, modelos semi-teóricos e modelos empíricos.
- É importante o conhecimento das formas de manifestação de humidade e como irão progredir durante o processo de secagem para o conhecimento da gravidade destas ocorrências.

# 3

## CARATERIZAÇÃO DO PROGRAMA TRHUMIDADE

### 3.1. INTRODUÇÃO

O programa TRHUMIDADE, escrito em *Fortran 77*, foi desenvolvido nos finais da década de 80 na FEUP por V.P. Freitas[7], trata-se de um programa de simulação numérica que tem como objetivo determinar os perfis do teor de humidade e de temperatura no interior de materiais e elementos de construção. Neste capítulo pretende-se fazer uma descrição do programa de forma a realçar as potencialidades do programa e de enquadrar com o objetivo deste trabalho.

### 3.2. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE NO TRHUMIDADE

#### 3.2.1. MODELO TEÓRICO DE TRANSFERÊNCIA DE LUIKOV E PHILIP- DE VRIES

O modelo matemático que está na base do programa TRHUMIDADE foi criado por *Luikov e Philip- De Vries*, este modelo permite estudar em conjunto a transferência de humidade, em fase líquida e vapor, e a transferência de calor. Apesar do estudo destes dois autores ser independente apenas diferem no tipo de variável para o teor de humidade, sendo que o de *Luikov* volúmico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) e o de *De Vries* ponderal ( $\text{kg}/\text{kg}$ )[7].

A difusão de humidade segundo este modelo, de uma forma simplificada, pode ser descrita da seguinte forma:

- Fase de vapor: inicialmente a transferência de humidade ocorre, devido ao efeito do gradiente de pressão parcial de vapor de água (baseado na *Lei de Fick*), nos poros preenchidos de ar. A partir do instante em que o vapor de água está sujeito a ambiências mais frias irá ocorrer a condensação de forma a atingir um novo ponto de equilíbrio relativo às pressões existentes, é portanto a partir de este instante que se inicia a transferência em fase líquida.
- Fase de líquida: a transferência de humidade realiza-se através do efeito do gradiente de sucção (o transporte líquido é traduzido através do recurso à lei de *Darcy*)

Estas duas formas de transferência de humidade, por norma, ocorrem em simultâneo e estão intrinsecamente ligadas à transferência de calor (assente na lei de *Fourier*)[38].

Devido ao fato do programa TRHUMIDADE utilizar o teor de humidade ponderal, torna-se necessário obter as equações simplificadas de *Philip- De Vries*. Por consequente, esta simplificação implica a

necessidade de desenvolver as equações de conservação de massa e calor para meios macroscopicamente homogéneos, representados em (1) e (2):

Conservação da massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \psi_i) = -\nabla(m_{ic} + m_{id}) + M_i \quad (3.1)$$

Conservação da energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i h_i + \rho_w h_w \psi_i) = -\nabla(q + h_w(m_{ic} + m_{id})) \quad (3.2)$$

Em que,

$\rho_i, \rho_w$	- Densidade do material i e da água respetiva	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m_{ic}, m_{id}$	- Densidade de fluxo de massa transportada por convecção e difusão	[kg/m <sup>2</sup> s]
$q$	- Densidade de fluxo de calor transportado por condução	[J/m <sup>2</sup> .s]
$M_i$	- Termo que traduz a condensação- evaporação do material i	[kg/m <sup>3</sup> .s]
$h_i, h_w$	- Entalpias mássicas do material i e da água, respetivamente	[J.m <sup>3</sup> /kg]
$\psi_i$	- Teor de humidade total do material	[m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> ]

Para a definição do sistema de equações diferenciais, utilizado no programa TRHUMIDADE é necessário recorrer às equações (3.1) e (3.2) baseado em diversos pressupostos e hipóteses simplificativas representadas no subcapítulo 3.2.1.1, como também nas leis de difusão de massa e de calor referidas anteriormente. Este desenvolvimento encontra-se expresso na Tese de doutoramento elaborada por Vasco Freitas [7].

Assim sendo, o sistema de equações diferenciais, utilizado no programa, que permite simular a transferência conjunta de calor e humidade, para um fluxo unidirecional em regime variável é expresso pelas equações (3.3) e (3.4):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi} \left( D_w \times \frac{\partial U}{\partial \chi} + D_T \frac{\partial T}{\partial \chi} \right) \quad (3.3)$$

$$\rho^* \times C^* \times \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi} \left( \lambda^* \times \frac{\partial T}{\partial \chi} \right) \quad (3.4)$$

Em que,

$U$	- Teor de humidade	[kg/kg]
$T$	- Temperatura	[°C]
$D_w$	- Difusividade hídrica	[m <sup>2</sup> /s]

$D_T$	- Difusividade higrotérmica	[m <sup>2</sup> /s.K]
$\rho^*$	- Massa volúmica equivalente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C^*$	- Calor específico equivalente	[J/kg.K]
$\lambda^*$	- Condutibilidade térmica aparente	[W/m.K]

### 3.2.1.1. LIMITAÇÕES E HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS DO MODELO

As principais limitações da teoria de Philip- De Vries são [7]:

- A estrutura dos materiais tem de ser indeformável, sendo que é válida para a maioria dos materiais de construção;
- Os materiais devem ser isotrópicos e macroscopicamente homogéneos;
- O fenómeno de “histeresis” (comportamento diferencial em embebição e secagem) não é tido em consideração;
- A temperatura dos materiais deve estar compreendida entre 4°C e 99°C, pois o modelo não tem em consideração fenómenos de congelamento, ebulição ou degelo.

Relativamente às hipóteses simplificativas, que foram referidas no subcapítulo 3.2.1, para a obtenção das equações (3.3) e (3.4), destacam-se entre outras as seguintes[7]:

- Não existem reações químicas entre a água e a estrutura porosa;
- Os materiais são impermeáveis ao ar;
- Os materiais porosos estão sujeitos a baixos gradientes de temperatura;
- O potencial de gravidade é desprezável;
- O transporte de calor devido ao fenómeno de evaporação/ condensação é desprezado relativamente ao transporte por difusão;
- O teor de humidade em fase de vapor é consideravelmente inferior ao da fase líquida.

### 3.2.2. Resolução numérica das equações de Philip- De Vries e Luikov

O sistema de equações diferenciais de Luikov e Philip- De Vries, já foi estudado e resolvido numericamente por vários autores, porém, estas resoluções apenas foram desenvolvidas para meios semi-infinitos ou elementos constituídos apenas por uma camada [7]. A elevada complexidade em resolver o problema inerente à interface entre elementos, provocado pela descontinuidade gerada no perfil do teor de humidade, fez com que a resolução numérica destas equações associado a mais de uma camada tenha sido menos utilizada e desenvolvida. O sistema a resolver no TRHUMIDADE, está expresso pelas equações (3) e (4) do presente capítulo.

Devido ao facto de se estar perante um sistema não linear, à presença de um fluxo unidirecional e à dificuldade em traduzir as condições nas interfaces, o autor optou pelo método das diferenças finitas para a resolução do sistema de equações.

O objetivo é determinar as funções  $U(\chi, t)$ , que corresponde à função do teor de humidade ao longo do material para o tempo  $t$ , e  $T(\chi, t)$ , que corresponde à função da temperatura ao longo do material para determinado tempo, para solucionar o sistema de equações em questão. Tendo em consideração que o programa opera num modelo 1D, apenas temos uma variável espacial na direção  $x$ , consequentemente na direção  $y$  as propriedades serão constantes. Sendo assim é possível derivar as funções relativamente ao tempo  $[0, T]$ , e duas vezes relativamente ao espaço  $[0, L]$ .

Para resolver o sistema de equações diferenciais através da utilização do método das diferenças finitas, é necessário fazer a discretização do elemento construtivo, através da construção de uma grelha com nós.

A grelha utilizada, na presente dissertação, para efetuar as respetivas simulações no TRHUMIDADE, é caracterizada por ser retangular, sendo os espaçamentos constantes nos dois eixos. O eixo x representa o elemento construtivo em largura e o eixo y corresponde ao tempo da discretização efetuado. Os espaçamentos adotados na grelha na direção y foi de  $\Delta t=0,1h=6min$ , na direção de x foi de  $\Delta X=0,005m$ , dividindo os 20 cm de espessura, dos materiais utilizados nas respetivas simulações, em 41 nós. Na figura 3.1 está representado uma grelha tipo representativa da utilizada no trabalho.

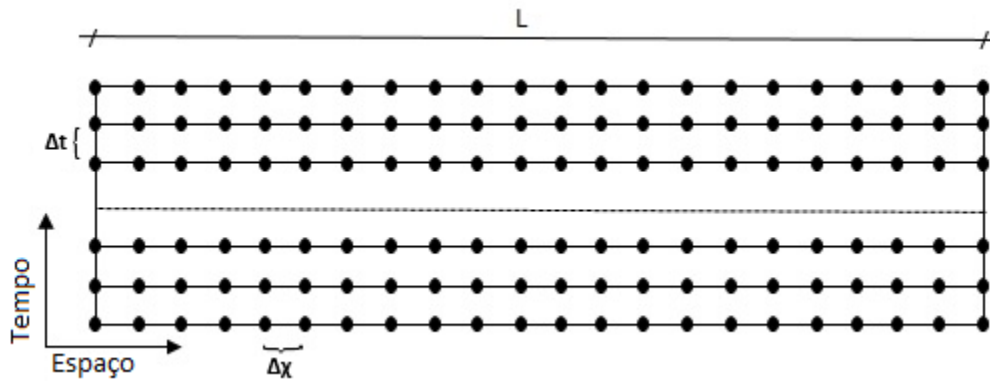


Figura 3.1- Grelha tipo utilizada para aplicação do método das diferenças finitas

Nos nós interiores a resolução do sistema consiste no desenvolvimento das equações (3.3) e (3.4). Relativamente aos nós interiores, devido ao fato de estarem em contato com a ambiência impõe condições fronteira que possibilitam determinar as restantes incógnitas. As igualdades impostas pelo material-ambiência, são definidas pelas equações (3.5), relativa à igualdade de fluxo de humidade e (3.6) relativo à igualdade de fluxo de calor.

$$\rho_0 \times D_w \left( \frac{\partial U}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \beta [PS_{sup} \times HR_{sup} - PS_{amb} \times HR_{amb}] \quad (3.5)$$

$$\left( \lambda^* \times \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h(T_{amb} - T_{sup}) \quad (3.6)$$

Em que,

$\beta$	- Coeficiente de transferência superficial de humidade	[m/s]
$PS$	- Pressão de saturação	[kg/m <sup>3</sup> ]
$HR$	- Humidade relativa	[%]
$sup$	- Superfície	[-]
$amb$	- Ambiente	[-]
$h$	- Coeficiente de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> .°C]

O processo utilizado para a linearização do respetivo sistema é complexo e envolve a utilização do método algoritmo de *Cranck-Nicholson*, que está descrito simplifadamente na tese doutoramento de Vasco Freitas[7].

O sistema é resolvido pelo algoritmo método de eliminação de *Gauss*, e a respetiva solução é obtida quando a diferença entre duas iterações consecutivas for inferior a um valor previamente definido, que representa a precisão que é pretendida.

### 3.3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

#### 3.3.1. PROGRAMA PRINCIPAL E SUB-ROTINAS

O código de cálculo é constituído pelo TRHUMIDADE, programa principal, e por oito sub-rotinas[7]:

- SOL- cálculo da temperatura fictícia ar-sol;
- COFENOM- interpolação dos coeficientes fenomenológicos;
- GAUSSBACON- resolução de um sistema linear de equações de matriz;
- MATAMB- cálculo das equações nos nós em contato com as ambiências;
- MATINT- cálculo das equações nos nós interiores;
- MATCOR- cálculo das equações nos nós das interfaces;
- PSATURAÇÃO- cálculo da pressão de saturação;
- HURELAT- cálculo da humidade relativa dos nós superficiais em função do teor de humidade.

O programa principal e as sub-rotinas foram desenvolvidas por *Vasco Freitas*[7], com a exceção da sub-rotina *Gaussbacon*, desenvolvida pelo *Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse*, e a sub-rotina SOL desenvolvida por *Vitor Abrantes*[39], que apenas sofreram algumas adaptações.

Na figura 3.2 e 3.3 é possível observar os esquemas dos processos de computação no qual se demonstrar a ligação entre as diferentes subrotinas e o programa principal, o processo e critério iterativo de convergência e os resultados obtidos.

Uma vez que o estudo de secagem na presente dissertação ter como objetivos principais avaliar e analisar a forma como algumas das propriedades ambientais influência o processo de secagem dos materiais, por consequente não será necessário utilizar elementos com mais de uma camada e a sub-rotina MATINT não será utilizada no processo de cálculo. Os elementos em estudo, no processo de secagem, são o betão celular e o barro vermelho, devendo-se ao facto de serem dois materiais com características diferentes, apresentadas posteriormente no subcapítulo 4.2.

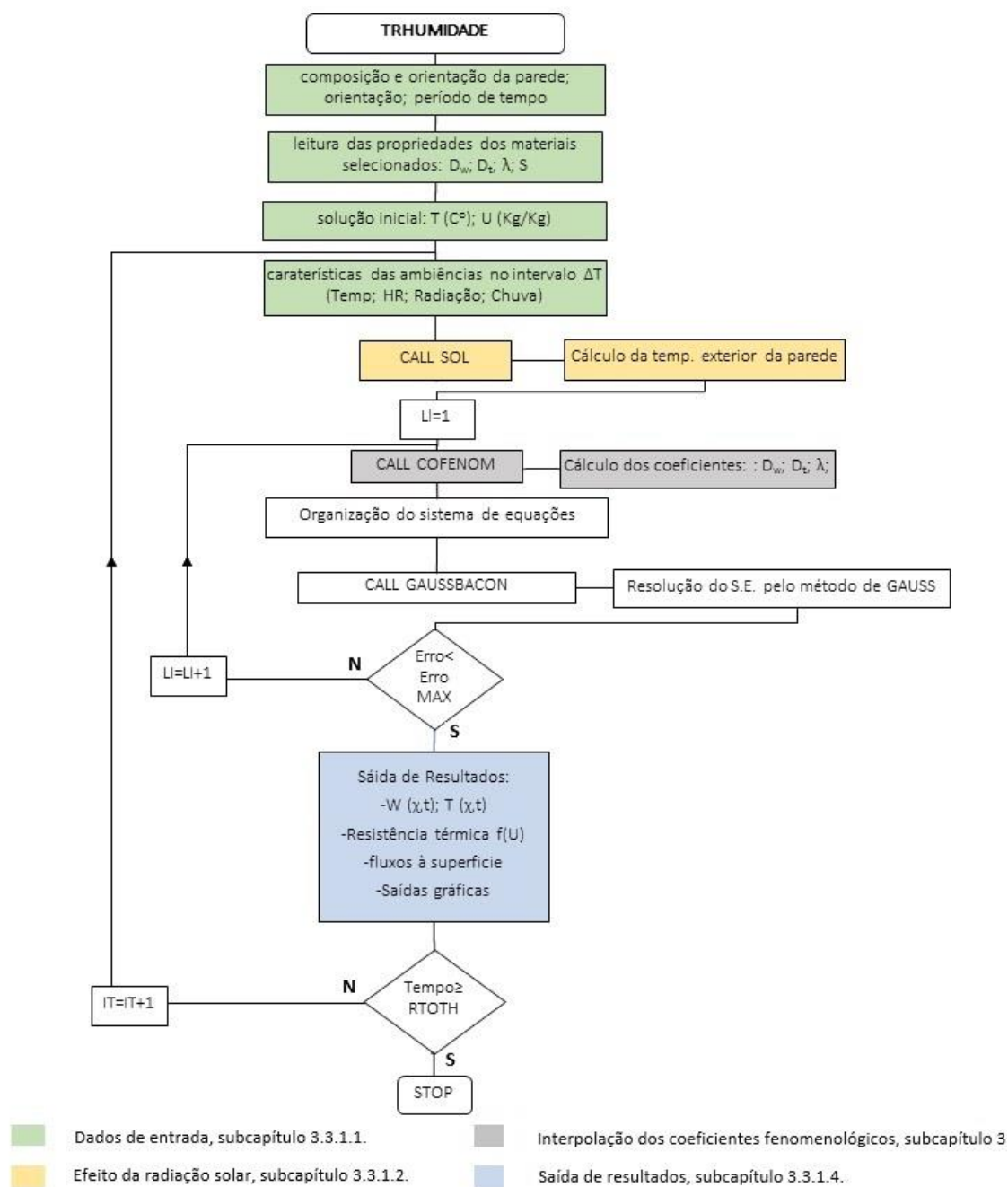


Figura 3.2- Organograma do programa TRHUMIDADE.

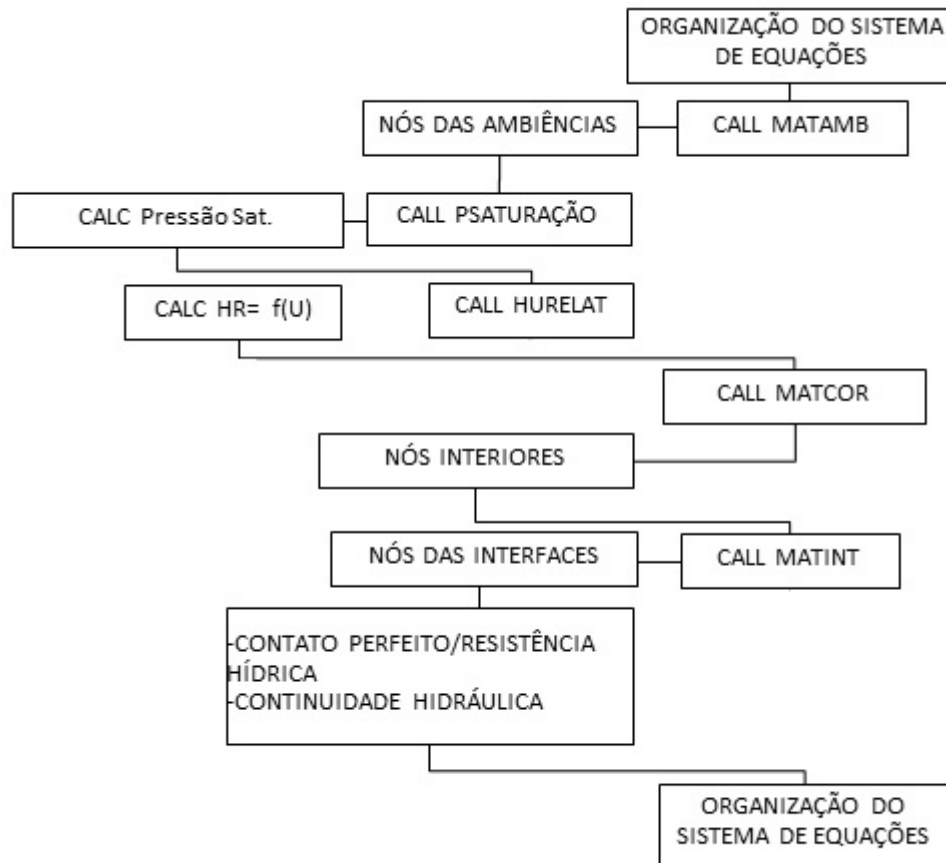


Figura 3.3- Esquema do processo de computação para organização do sistema de equações.

### 3.3.1.1. ENTRADA DE DADOS

Para utilizar o programa é necessário introduzir vários dados relativos ao elemento em estudo, esses dados terão de ser introduzidos nos seguintes ficheiros:

- INTDADOS- ficheiro que inclui dados relativos à composição da parede, ao tempo a simular e à respetiva orientação;
- Base de dados com os coeficientes fenomenológicos, em função do teor de humidade e temperatura-  $D_w(U, T)$ ,  $D_T(U, T)$ ,  $\lambda(U, T)$  e  $S(U, T)$ ;
- SOLIT e SOLIN- que correspondem à temperatura inicial do elemento e ao respetivo teor de humidade;
- METE- este ficheiro é relativo às características climáticas em função do tempo.

No ficheiro INTDADOS existem dados que não são essenciais comparativamente a análises em condições reais. Entre esses dados encontram-se as datas de simulação, denominadas por RTOTH na figura 3.2, pois não será necessário existir uma sincronia entre as datas e as condições climáticas, que serão introduzidas à posteriori no ficheiro METE em função de um determinado tempo. A latitude, longitude, orientação da parede e o fluxo máximo transmitido na interface também serão dispensáveis.

Ainda no ficheiro INTDADOS, foi considerado que os coeficientes de transferência superficial interior e exterior,  $\beta$ , seria 0,0003 m/s em ambos os casos. A determinação deste valor tem um elevado grau de dificuldade experimental. O valor que será utilizado está em concordância com a tese de doutoramento



de Vasco Freitas, na qual o autor determinou o respetivo coeficiente através da relação entre o fluxo de secagem e a diferença de concentração do vapor de água na superfície do material e na ambiência, segundo a expressão (3.7).

$$g = \beta [PS_{sup} \times HR_{sup} - PS_{amb} \times HR_{amb}] \quad (3.7)$$

No ficheiro METE, é importante realçar que o programa não contabiliza o valor real da chuva incidente, apenas permite escolher entre a sua ocorrência ou não. Quando o programa faz a simulação para a ocorrência de precipitação ele considera que, para esse instante, o teor de humidade na superfície do elemento exterior se encontra saturado, pelo que apenas existe a opção de ocorrer ou não ocorrer.

No ficheiro SOLIN e SOLIT serão preenchidos os vetores relativos ao teor de humidade inicial e da temperatura inicial respetivamente. É importante destacar que como o presente trabalho se destina a estudar o processo de secagem, o valor do teor de humidade inicial será considerado o valor do teor de humidade de saturação para cada elemento, este valor encontra-se no vetor VLIN. Os coeficientes fenomenológicos relativos ao vetor VLIN e ao vetor COL, correspondem a valores de teores de humidade e temperaturas respetivamente. Quando é introduzido no programa, o código relativo ao material em estudo, este faz automaticamente a leitura destes vetores que estão associados às matrizes MATDW, MATDT, MATSUC e MATLBD. Os restantes coeficientes fenomenológicos serão apresentados por matrizes com os valores de  $Dw(U,T)$ ,  $Dt(U,T)$ ,  $\lambda(U,T)$  e  $S(U,T)$ , relativos à difusidade hídrica, difusividade térmica, condutibilidade térmica e sucção capilar respetivamente, propriedades do material em estudo.

O programa TRHUMIDADE exige um elevado número de dados de entrada, porém após estar construída a base dados, para fazer diferentes simulações apenas teremos de alterar alguns parâmetros. Na maioria dos casos essas alterações apenas se registam no ficheiro INTDADOS e METE.

### 3.3.1.2. CONTRIBUIÇÃO DO EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR

O contributo da radiação solar relativamente à temperatura exterior é preciso ter em conta para simulações que pretendam representar condições climáticas reais. Tendo em consideração este fato o programa determina a temperatura fictícia ar-sol na sub-rotina SOL. Para a sua determinação é preciso ter em consideração a orientação da parede, a latitude e longitude do lugar, a hora e a direção e velocidade do vento. No programa o valor que é introduzido, relativamente à radiação solar, é no plano horizontal pois as estações meteorológicas fornecem os valores nesse plano. Porém o TRHUMIDADE faz automaticamente essa conversão.

A temperatura fictícia ar-sol,  $T_{sol}$ , é então definida pela equação (3.8):

$$T_{sol} = T_{ext} + \alpha \times \frac{Rad}{he} \quad (3.8)$$

Tendo em conta que o fluxo de calor é dado pela expressão (3.9), conseguimos obter os valores de  $q_1$  e  $q_2$  respetivamente. Considerando que  $q_1=q_2$ , podemos então determinar a temperatura fictícia da

ambiência exterior através da expressão (3.12), que resulta das equações (3.10) ,(3.11) e da igualdade entre elas.

$$q_1 = (T_{extfic} - T_{sol}) \times 1 \frac{1}{\left(\frac{1}{he}\right)} \quad (3.10)$$

$$q_2 = (T_{sol} - T_{int}) \times \frac{1}{R_{term}} \quad (3.11)$$

$$T_{extfic} = \frac{1}{he} \times \frac{(T_{sol} - T_{int})}{R_{term}} + T_{sol} \quad (3.12)$$

$q$	- Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$K$	- Coeficiente de transmissão térmica	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$he$	- Condutância térmica superficial exterior	[W/(m <sup>2</sup> .C)]
$R_{term}$	- Resistência térmica do elemento construtivo, incluindo a resistência térmica superficial	[(m <sup>2</sup> .°C)/W]

Num processo de secagem, a radiação solar irá originar o aquecimento do parâmetro exterior, aumentando, numa primeira fase, a diferença da concentração de vapor entre a ambiência e a superfície do elemento. Na figura 3.4 está representado a forma como o programa determina estes dois parâmetros, que são fundamentais para a resolução das condições impostas nos nós em contato com o exterior. A concentração de vapor,  $PS_{sup} \times HR_{sup}$  em kg/m<sup>3</sup>, é determinada a partir da temperatura fictícia ar-sol,  $T_{sol}$ , enquanto a humidade relativa na superfície é calculada através das curvas de absorção/desabsorção.

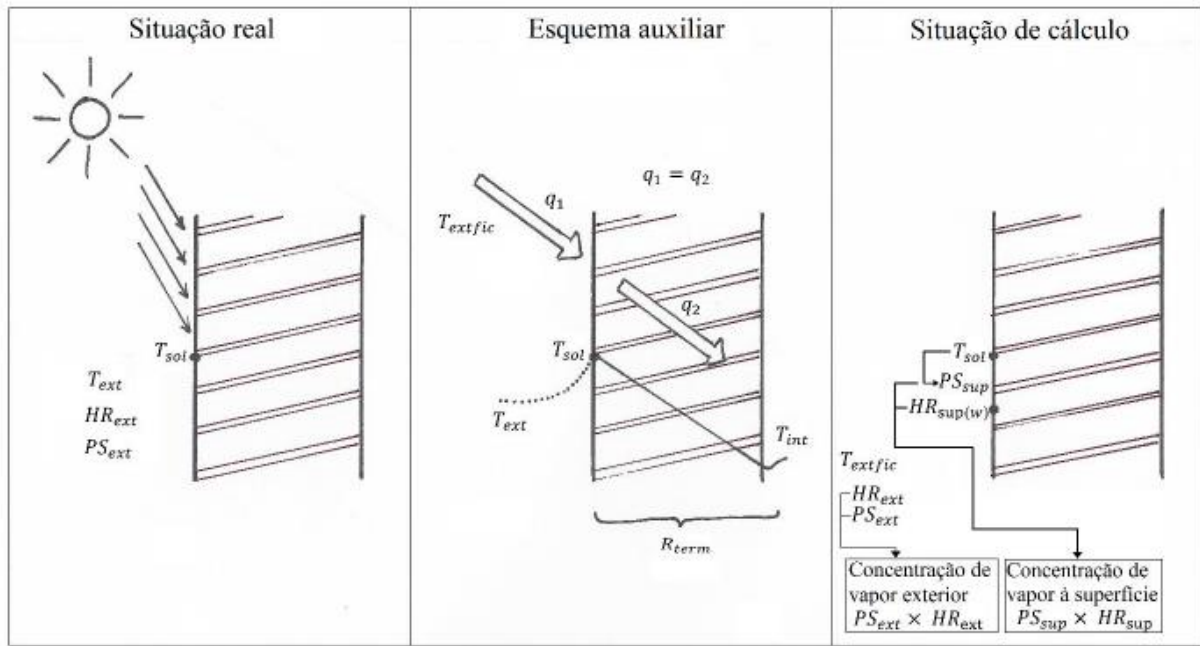


Figura 3.4- Introdução da radiação solar no programa de cálculo[7].

Nas simulações em que a radiação não será tida em consideração, a sub-rotina SOL continua a ser chamada no algoritmo do programa, porém terá simplificações. Um exemplo deste caso concreto é a igualdade entre a temperatura ambiente exterior e a temperatura fictícia exterior.

### 3.3.1.3. INTERPOLAÇÃO DOS COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS

Para a sequência de cálculo do programa e para a linearização do sistema de equações (3.3) e (3.4), é necessário o conhecimento dos coeficientes  $D_w$ ,  $D_T$ ,  $\lambda$  e  $S$  para qualquer que seja o valor da temperatura e da humidade ( $U_j, T_j$ ). Como foi demonstrado no subcapítulo 3.3.1.1, estes valores são dados sob a forma matricial, o autor do programa teve a necessidade de criar um algoritmo de interpolação, criando assim a sub-rotina COFENOM. Esta sub-rotina tem como objetivo a leitura, para cada parâmetro, a leitura dos quatro valores tabelados do parâmetro em questão para as temperaturas e humidades imediatamente superiores e inferiores aos pretendidos, como representado na figura 3.5.

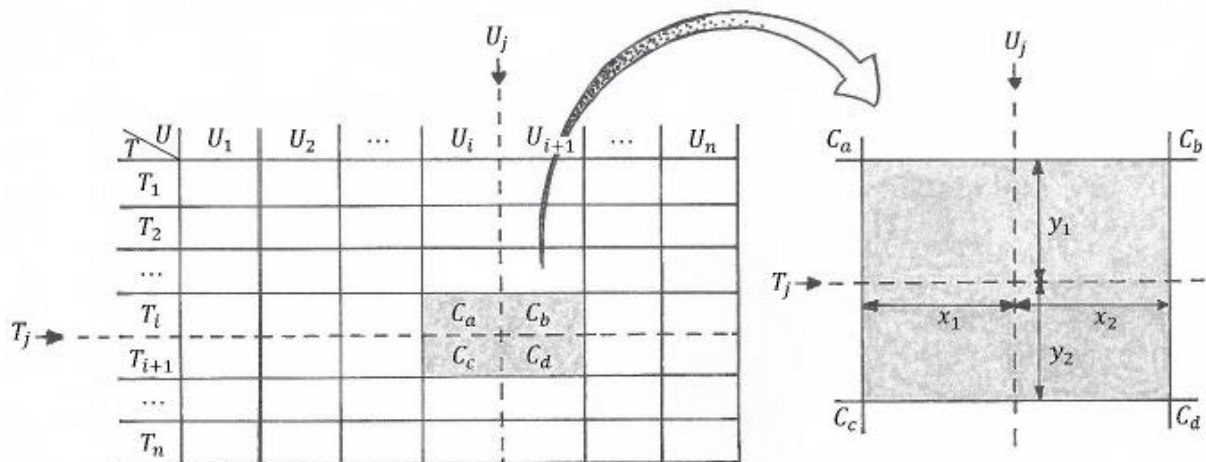


Figura 3.5- Interpolação dos coeficientes fenomenológicos.

Após a leitura dos quatro valores, o programa executa uma dupla interpolação linear, obtendo assim o valor pretendido,  $C_{Uj,Tj}$ , apresentado na expressão (3.13).

$$C_{Uj,Tj} = \frac{\left( \frac{C_a \times y_2 + C_c \times y_1}{y_1 + y_2} \right) \times x_2 + \left( \frac{C_b \times y_2 + C_d \times y_1}{y_1 + y_2} \right) \times x_1}{x_1 + x_2} \quad (3.9)$$

### 3.3.1.4. SAÍDA DE RESULTADOS

O programa permite obter gráficos ou diagramas dos perfis do teor de humidade e da temperatura em função do tempo, a evolução da resistência térmica dos elementos em função do perfil do teor de humidade ao longo do tempo como também permite conhecer fluxos de humidade que atravessem a superfície de separação material-ar. No capítulo seguinte serão evidenciadas mais detalhadamente algumas das potencialidades gráficas do programa.

Na figura 3.6, representa-se um excerto da estrutura do ficheiro de resultados, RTH. É possível verificar os valores obtidos para em seguida criar saídas gráficas.

1	2	3	4	5	6	7
5,000000	2,000000	0,100000	0,000000	0,520000	23,093000	-0,000032
5,000000	2,000000	0,100000	0,005000	0,364000	21,747000	-0,000032
5,000000	2,000000	0,100000	0,010000	0,114000	20,758000	-0,000032
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
5,000000	2,000000	0,100000	0,195000	0,012000	22,514000	-0,000032
5,000000	2,000000	0,100000	0,200000	0,016000	25,217000	-0,000032
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1,000000	3881,000000	388,000000	0,000000	0,520000	25,000000	0,000013
1,000000	3881,000000	388,000000	0,005000	0,519000	25,000000	0,000013
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1,000000	3881,000000	388,000000	0,195000	0,054000	25,000000	0,000013
1,000000	3881,000000	388,000000	0,200000	0,035000	25,000000	0,000013

#### Legenda,

- 1 – Número de iterações no mesmo instante
- 2 – Número de intervalos de tempo considerados
- 3 – Instante de tempo t (h)
- 4 – Posição do nó em relação à superfície exterior (m)
- 5 – Teor de humidade em (Kg/Kg)
- 6 – Temperatura (°C)
- 7 – Fluxo de humidade na superfície interior (Kg/m<sup>2</sup>.s)

Figura 3.6- Excerto do ficheiro de resultados, RTH, para uma simulação em betão celular.

### 3.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as seguintes informações:

- O modelo matemático que está na base do programa TRHUMIDADE foi criado por *Luikov e Philip- De Vries*, este modelo permite estudar em conjunto a transferência de humidade, em fase líquida e vapor, e a transferência de calor;
- O sistema de equações diferenciais de Luikov e Philip- De Vries, já foi estudado e resolvido numericamente por vários autores, porém, estas resoluções apenas foram desenvolvidas para meios semi-infinitos ou elementos constituídos apenas por uma camada;
- O TRHUMIDADE é um programa escrito em *Fortran 77* que resolve o sistema de equações de transferência de calor e humidade através do método das diferenças finitas, através da construção de uma grelha com nós, onde o sistema de equações diferenciais é resolvido.

# 4

## **CARATERIZAÇÃO DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo pretende-se caraterizar os parâmetros e as simulações a realizar para o estudo da sensibilidade do processo de secagem quando sujeito a diferentes condições ambientais. Para tal será necessário descrever as propriedades dos materiais que irão constituir a parede em estudo assim como demonstrar como são executadas as simulações que estão na base do estudo de sensibilidade do processo de secagem. As simulações a efetuar irão variar individualmente os principais coeficientes fenomenológicos mantendo os restantes constantes para poder avaliar a influência que cada um terá nos materiais em estudo.

### **4.2. CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM ESTUDO**

Os materiais selecionados para este trabalho são o barro vermelho e o betão celular. A escolha destes dois materiais deve-se ao facto de ambos os materiais terem sido devidamente caraterizados pelo autor do programa, V.P. Freitas [7], sendo que muitas das propriedades foram determinadas por via experimental pelo mesmo, e pelo facto de se tratarem de dois materiais com diferentes comportamentos durante o processo de secagem. Como será posteriormente referido, o betão celular tem um comportamento atípico sendo o barro vermelho um material com uma estrutura porosa mais estável.

As propriedades representadas no quadro 4.1 são os dados que serão introduzidos no ficheiro INTDADOS, definindo as propriedades dos materiais que compõe a parede que será alvo de estudo. É importante salientar que a diferença da porosidade nos dois materiais é bastante acentuada, podendo levar a diferentes resultados no que respeita ao processo de secagem.

Quadro 4.1 – Propriedades do betão celular e do barro vermelho

Propriedade	Betão celular	Barro vermelho
Massa volúmica seca, $\rho_0$ (Kg/m <sup>3</sup> )	525	1925
Calor específico do material seco, $C_0$ (J/Kg.K)	1050	920
Porosidade, $\xi$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,66	0,28
Condutância térmica superficial exterior e interior, $h_e$ ; $h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	25	25
Coeficiente de transferência superficial de humidade exterior e interior, $\beta_e$ ; $\beta_i$ (m/s)	0,00300	0,00300

O programa TRHUMIDADE necessita das curvas de absorção/desabsorção dos materiais para determinar a humidade relativa à superfície do elemento construtivo durante o processo de secagem, dados que serão introduzidos numa das sub-rotinas MATAMB. As respetivas curvas foram determinadas experimentalmente por V.P. Freitas [7] para o betão celular e para o barro vermelho. Porém apesar da existência de um comportamento diferente durante a absorção e a desabsorção, denominado por efeito de “histeresis”, o autor do programa optou pela utilização de uma função única, desprezando o efeito de “histeresis”. É importante realçar que uma das limitações do programa, referido no subcapítulo 3.2.1.1, é que a teoria de *Philip-De Vries* não tem em consideração o fenómeno de *histeresis*. Também é importante destacar que a técnica utilizada pelo autor tem como limitação a dificuldade em obter valores do teor de humidade precisos para humidades relativas superiores a 95%.

Como mencionado no subcapítulo 2.2.2.2, o domínio higroscópico apenas representa uma gama de valores, relativos ao teor de humidade, que determinado material pode conter. Os teores de humidade superiores a este domínio, portanto superiores ao teor de humidade crítico ( $U_{cr}$ ), serão introduzidos no vetor VLIN, em função dos quais as propriedades dos materiais dependentes do teor de humidade serão definidas. O valor máximo representado no vetor VLIN corresponde ao teor de humidade de saturação ( $U_{sat}$ ), pelo que os valores considerados para as simulações foram de 0,13 e 0,52 Kg/Kg, para o barro vermelho e para o betão celular respetivamente.

Na figura 4.1 e 4.2 estão representadas as curvas higroscópicas, introduzidas no TRHUMIDADE, do betão celular e do barro vermelho respetivamente. Como é possível observar os materiais possuem teores de humidade crítico muito diferentes, sendo este um dos fatores da utilização destes dois materiais para o estudo do fenómeno de secagem em materiais de construção.

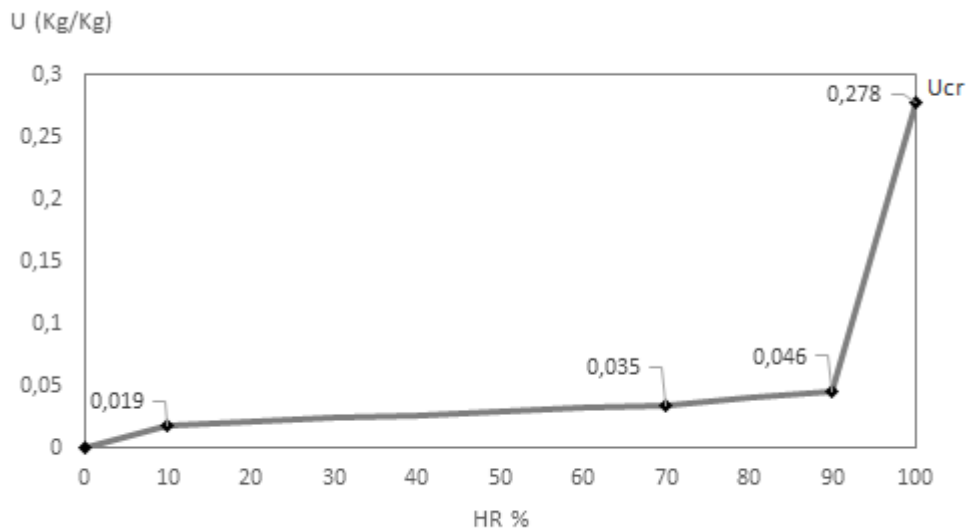


Figura 4.1 – Curva higroscópica do betão celular introduzida no TRHUMIDADE

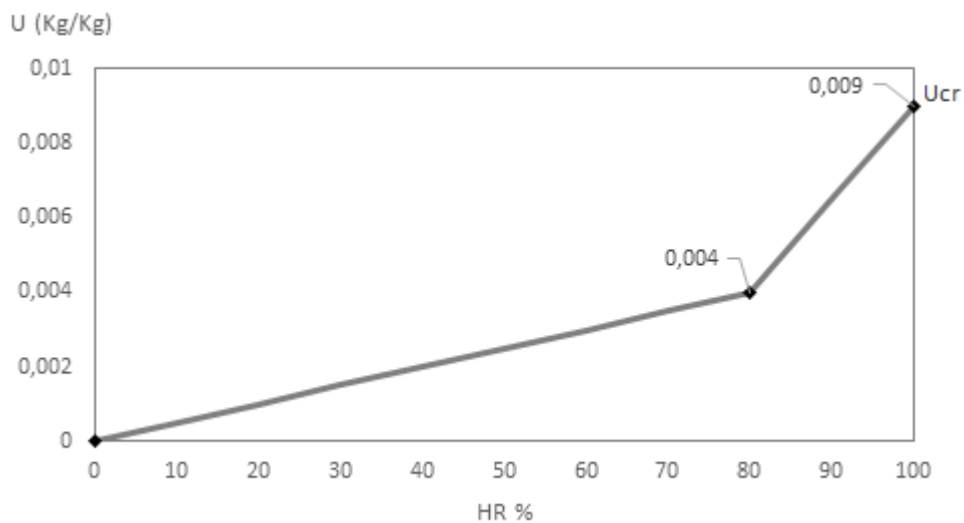


Figura 4.2 – Curva higroscópica do barro vermelho introduzida no TRHUMIDADE

No quadro 4.2 e 4.3 estão representadas as propriedades dos materiais em função do teor de humidade, para o betão celular e o barro vermelho respetivamente. As propriedades que irão ser função do teor de humidade são:

- Difusividade hídrica-  $D_w$
- Difusividade higrotérmica-  $D_t$
- Condutibilidade térmica-  $\lambda$
- Sucção capilar-  $S$

Estas propriedades serão necessárias introduzir na sub-rotina MATAMB.



Quadro 4.2 – Propriedades do Betão celular dependentes do teor de humidade

U(Kg/Kg)	D <sub>w</sub> (m <sup>2</sup> /s)	D <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> /s.K)	λ (W/m.K)			S (Pa)
			10°C	30°C	50°C	
0,011	8,06 x 10 <sup>-8</sup>	2,01 x 10 <sup>-13</sup>	0,140	0,141	0,144	7,87 x 10 <sup>8</sup>
0,016	6,27 x 10 <sup>-8</sup>	2,46 x 10 <sup>-13</sup>	0,142	0,144	0,148	6,90 x 10 <sup>8</sup>
0,031	8,90 x 10 <sup>-9</sup>	2,91 x 10 <sup>-12</sup>	0,149	0,153	0,161	4,00 x 10 <sup>8</sup>
0,062	1,44 x 10 <sup>-9</sup>	8,36 x 10 <sup>-12</sup>	0,163	0,171	0,187	1,81 x 10 <sup>7</sup>
0,158	5,39 x 10 <sup>-9</sup>	2,14 x 10 <sup>-11</sup>	0,211	0,241	0,277	8,40 x 10 <sup>5</sup>
0,272	5,20 x 10 <sup>-9</sup>	3,18 x 10 <sup>-11</sup>	0,278	0,345	0,430	2,30 x 10 <sup>5</sup>
0,388	1,16 x 10 <sup>-8</sup>	3,81 x 10 <sup>-11</sup>	0,313	0,400	0,565	8,65 x 10 <sup>4</sup>
0,472	2,72 x 10 <sup>-8</sup>	3,75 x 10 <sup>-11</sup>	0,337	0,414	0,611	2,42 x 10 <sup>4</sup>
0,500	9,84 x 10 <sup>-8</sup>	3,28 x 10 <sup>-11</sup>	0,345	0,419	0,618	1,04 x 10 <sup>4</sup>
0,511	1,26 x 10 <sup>-7</sup>	1,95 x 10 <sup>-11</sup>	0,348	0,421	0,620	4,96 x 10 <sup>3</sup>
0,520	1,49 x 10 <sup>-7</sup>	1,56 x 10 <sup>-12</sup>	0,351	0,422	0,617	5,18 x 10 <sup>3</sup>

Quadro 4.3 – Propriedades do Barro vermelho dependentes do teor de humidade

U(Kg/Kg)	D <sub>w</sub> (m <sup>2</sup> /s)	D <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> /s.K)	λ (W/m.K)			S (Pa)
			10°C	30°C	50°C	
0,000	2,50 x 10 <sup>-9</sup>	4,95 x 10 <sup>-12</sup>	1,00	1,00	1,00	8,00 x 10 <sup>8</sup>
0,005	2,02 x 10 <sup>-9</sup>	6,30 x 10 <sup>-12</sup>	1,05	1,05	1,05	4,42 x 10 <sup>8</sup>
0,010	1,54 x 10 <sup>-9</sup>	1,03 x 10 <sup>-11</sup>	1,09	1,10	1,10	8,35 x 10 <sup>7</sup>
0,020	2,64 x 10 <sup>-9</sup>	1,53 x 10 <sup>-11</sup>	1,18	1,19	1,20	1,34 x 10 <sup>7</sup>
0,040	6,53 x 10 <sup>-9</sup>	1,88 x 10 <sup>-11</sup>	1,36	1,38	1,39	7,14 x 10 <sup>5</sup>
0,070	2,21 x 10 <sup>-8</sup>	1,77 x 10 <sup>-11</sup>	1,55	1,58	1,60	2,02 x 10 <sup>5</sup>
0,090	5,61 x 10 <sup>-8</sup>	1,56 x 10 <sup>-11</sup>	1,69	1,72	1,73	1,26 x 10 <sup>5</sup>
0,110	1,37 x 10 <sup>-7</sup>	1,08 x 10 <sup>-11</sup>	1,84	1,86	1,87	5,05 x 10 <sup>4</sup>
0,120	1,78 x 10 <sup>-7</sup>	7,85 x 10 <sup>-12</sup>	1,92	1,93	1,93	1,26 x 10 <sup>4</sup>
0,130	3,91 x 10 <sup>-7</sup>	4,95 x 10 <sup>-12</sup>	2,00	2,00	2,05	2,87 x 10 <sup>3</sup>

### 4.3. SIMULAÇÃO BASE

Para avaliar a sensibilidade do processo de secagem, em materiais porosos, quando sujeito a diferentes condições ambientais, no TRHUMIDADE, foi necessário estabelecer uma simulação de base. Esta simulação base é necessária pois para uma correta análise da influência que cada parâmetro ambiental tem, será necessário manter todas as outras propriedades constantes. É importante realçar que se pretende avaliar a sensibilidade do processo de secagem face a diferentes variáveis ambientais, portanto é necessário criar uma simulação base, característica de um processo de secagem em ambiente laboratorial, que será necessária para a avaliação de cada fator ambiental, apenas variando o fator ambiental em análise.

As propriedades dos materiais necessárias introduzir no programa encontram-se descritas no subcapítulo 4.2, estas propriedades serão constantes em todas as simulações numéricas, pelo que no quadro 4.4 apenas estão representadas as propriedades ambientais e a temperatura e teor de humidade inicial do material em análise, da simulação base.

Quadro 4.4- Propriedades ambientais, teor de humidade inicial e temperatura inicial da parede

Propriedade	
Humidade relativa exterior e interior (%)	50
Temperatura exterior e interior (°C)	25
Precipitação (1-Sim/ 0-Não)	0
Radiação (W/m <sup>2</sup> )	0
Temperatura inicial do material (°C)	25
Teor de humidade inicial do betão celular e do barro vermelho (kg/kg)	0,52/0,13*

**\*Nota:** Devido ao facto de o objetivo ser analisar o processo de secagem, o teor de humidade inicial do material escolhido corresponde ao respetivo valor do teor de humidade de saturação, assim sendo o material encontra-se saturado. Apesar de ser possível utilizar valores superiores, estes são difíceis de serem atingidos devido ao ar que se encontra preso no interior do material.

Na figura 4.3 apresenta-se a evolução a variação dos perfis de humidade do barro vermelho respetivo à simulação base.

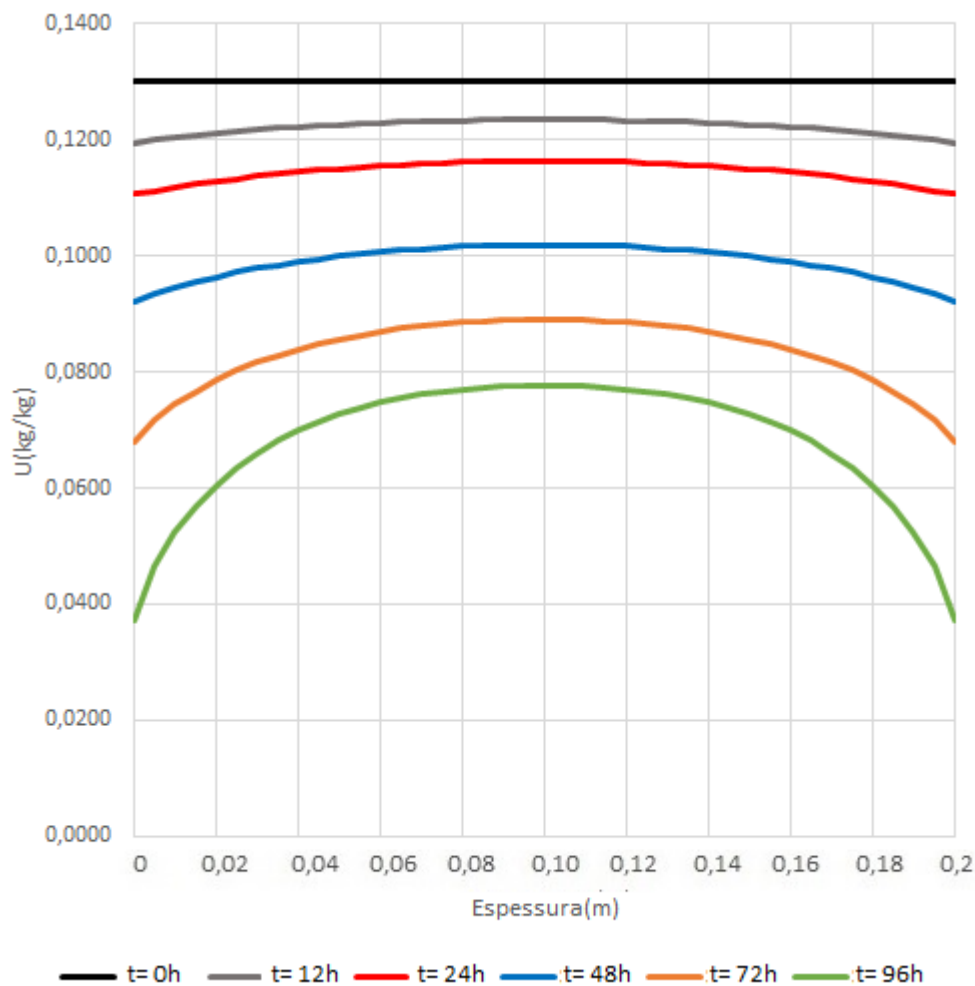


Figura 4.3- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para a simulação base.

#### 4.4. CARATERIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRIAS

##### 4.4.1. HUMIDADE RELATIVA

Para avaliar a influencia que a humidade relativa ambiente assume no transporte de humidade no betão celular e o barro vermelho procedeu-se às simulações apresentadas no quadro 4.5 de forma a traduzir as configurações presentes na figura 4.4. Para a compreensão dos intervalos adotados é importante ter em consideração que o valor mínimo adotado foi de 10% pois humidades relativas inferiores a 10% são características de ambientes em estufa, o valor máximo adotado de 90%, como referido em 4.2, tem em consideração o facto de que houve uma dificuldade em obter valores precisos do teor de humidade pertencentes ao domínio higroscópico, dos materiais em análise, quando sujeitos a humidades relativas superiores a 95% por V.P. Freitas[7], pois a técnica utilizada não permite a obtenção de dados valores precisos. Os valores intermédios utilizados tiveram como principal objetivo facilitar o tratamento numérico, a utilização de intervalos constantes possibilita a perceção do tipo de evolução que a secagem terá segundo intervalos iguais da humidade relativa. É essencial referir que para uma análise correta da influência de que cada valor da humidade relativa a analisar foi necessário considerar que a humidade relativa exterior é igual à humidade relativa interior, tornando as simulações por simetria.

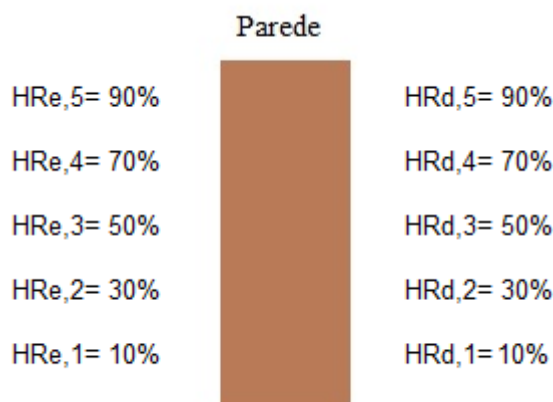


Figura 4.4- Configuração das simulações a efetuar para a humidade relativa ambiente

Quadro 4.5 – Descrição das simulações efetuadas para a humidade relativa

<b>H<sub>rext</sub>, H<sub>rint</sub> (%)</b>	<b>T<sub>ext</sub>, T<sub>int</sub> (°C)</b>	<b>Precipitação (1-Sim/ 0- Não)</b>	<b>Radiação (W/m²)</b>	<b>T<sub>imi</sub> (°C)</b>	<b>U<sub>imi</sub> (Kg/Kg)</b>		<b>Ref. da simulação</b>	
					Betão C.	Barro V.	Betão c.	Barro v.
10	25	0	0	25	0,52	0,13	1BC-HR	1BV-HR
30							2BC-HR	2BV-HR
50							3BC-HR	3BV-HR
70							4BC-HR	4BV-HR
90							5BC-HR	5BV-HR

**\*Nota**-As simulações que se encontram referidas nas tabelas pela cor   apresentam-se no capítulo 5, sendo que as restantes se encontram em anexo.

#### 4.4.2. TEMPERATURA

Com o intuito de avaliar a influencia que a temperatura ambiente tem no processo de secagem, foram realizadas várias simulações, presentes no quadro 4.6, variando linearmente o valor da temperatura, com a exceção da temperatura de 25°C que foi analisada devido ao facto de este ser o valor que corresponde à temperatura da simulação base. Tal como no estudo da humidade relativa, a temperatura exterior será idêntica à temperatura interior devido ao facto de estarmos perante uma simulação em simetria, assim como também foi considerado que a temperatura do interior do material idêntica às temperaturas nas interfaces. Nesta análise não constam valores inferiores a 0°C pois o modelo de *Philip- De Vries*, como referido no subcapítulo 3.2.2, tem como uma das principais limitações o facto de não considerar fenómenos de congelamento. Não foram consideradas temperaturas superiores a 50°C pois o programa de cálculo não permite introduzir temperaturas superiores. Na figura 4.5 apresenta-se a configuração das simulações a efetuar.

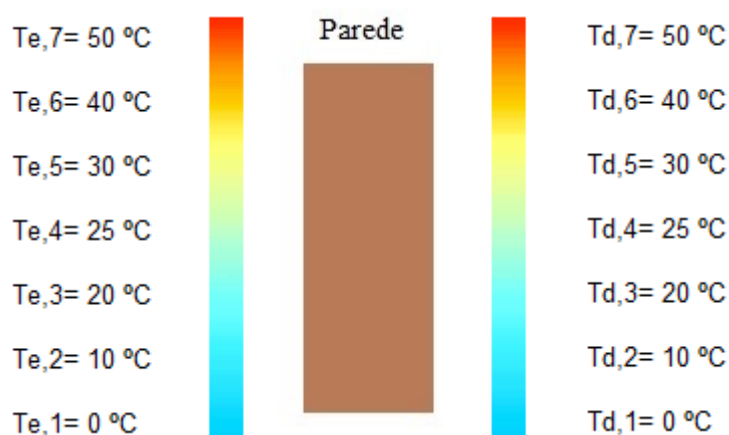


Figura 4.5- Configuração das simulações a efetuar para a temperatura ambiente.

Quadro 4.6 – Descrição das simulações efetuadas para a temperatura.

<b>Hr<sub>ext</sub>, HR<sub>int</sub> (%)</b>	<b>T<sub>ext</sub>, T<sub>int</sub> (°C)</b>	<b>Precipitação (1-Sim/ 0- Não)</b>	<b>Radiação (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>T<sub>ini</sub> (°C)</b>	<b>U<sub>ini</sub> (Kg/Kg)</b>		<b>Ref. da simulação</b>	
					Betão c.	Barro V.	Betão c.	Barro v.
50	0	0	0	0	0,52	0,13	1BC-T	1BV-T
	10			10			2BC-T	2BV-T
	20			20			3BC-T	3BV-T
	25			25			4BC-T	4BV-T
	30			30			5BC-T	5BV-T
	40			40			6BC-T	6BV-T
	50			50			7BC-T	7BV-T

\***Nota**-As simulações que se encontram referidas nas tabelas pela cor   apresentam-se no capítulo 5, sendo que as restantes se encontram em anexo.

#### 4.4.3. PRECIPITAÇÃO

No estudo que a influência da precipitação tem no processo de secagem do material, é fundamental ter em consideração, tal como referido no subcapítulo 3.3.1.1., que o programa apenas possibilita a introdução da ocorrência ou a não ocorrência de precipitação, sendo que quando ocorre considera-se que na superfície exterior do material o teor de humidade é igual ao teor de humidade de saturação. Como tal foram realizadas simulações com diferentes intervalos em que ocorria precipitação, para tal foi considerado que a precipitação forte num intervalo de 4 horas ocorria durante 1 hora, para a precipitação de intensidade média foi considerado que num intervalo de 4 horas ocorria precipitação durante 1 hora, e para a precipitação de intensidade fraca foi considerado que num intervalo de oito

horas apenas ocorria durante uma hora. Como tal apresenta-se nos quadros 4.7, 4.8 e 4.9 com as sequências horárias de precipitação que serão introduzidas no TRHUMIDADE, para as respetivas simulações a efetuar descritas no quadro 4.10. Na figura 4.6 é apresentado a configuração da simulação a efetuar.

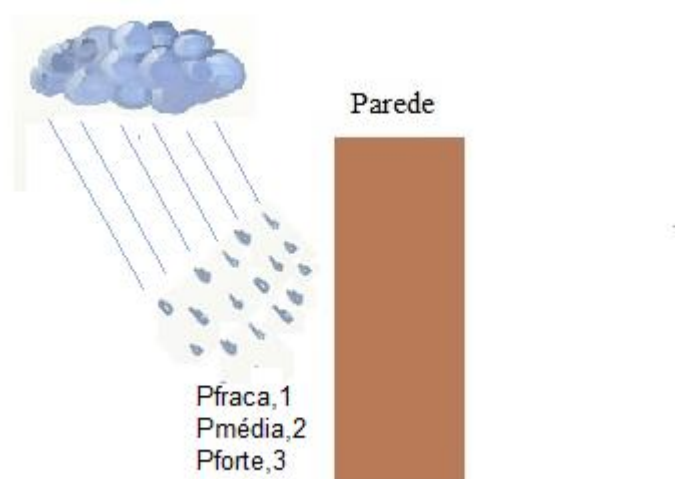
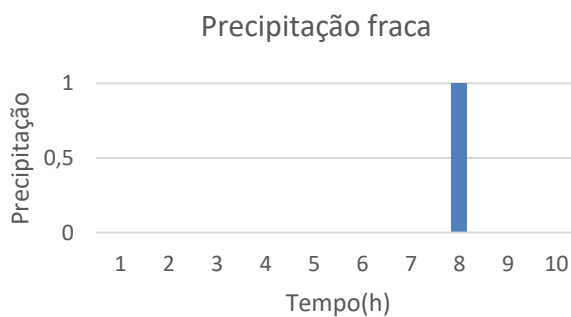
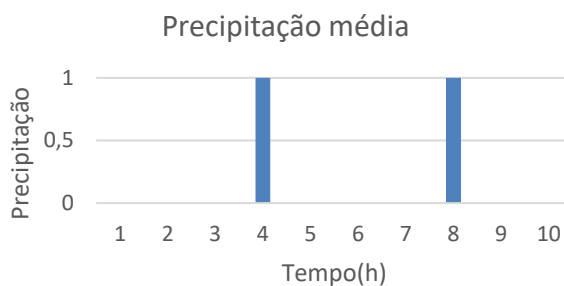


Figura 4.6- Configuração das simulações a efetuar para a precipitação.

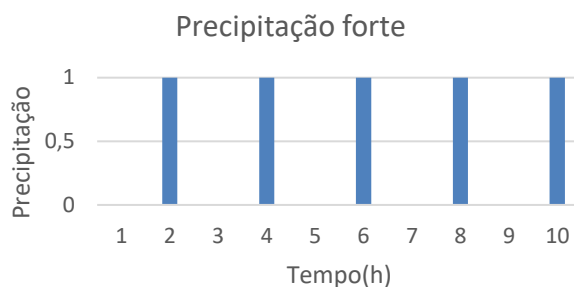
Quadro 4.7 – Representação horária da precipitação de intensidade fraca.



Quadro 4.8 – Representação da sequência horária da precipitação de intensidade fraca.



Quadro 4.9 – Representação da sequência horária da precipitação de intensidade forte.



Quadro 4.10 – Descrição das simulações efetuadas para a precipitação

Hr <sub>ext</sub> , HR <sub>int</sub> (%)	T <sub>ext</sub> , T <sub>int</sub> (°C)	Precipitação (1-Sim/ 0- Não)	Radiação (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>imi</sub> (°C)	U <sub>imi</sub> (Kg/Kg)		Ref. da simulação	
					Betão C.	Barro V.	Betão c.	Barro v.
50	25	Fraca	0	25	0,52	0,13	1BC-P	1BV-P
		Média					2BC-P	2BV-P
		Forte					3BC-P	3BV-P

**\*Nota**-As simulações que se encontram referidas nas tabelas pela cor   apresentam-se no capítulo 5, sendo que as restantes se encontram em anexo.

#### 4.4.4. RADIAÇÃO

Para avaliar a influência que a radiação tem na sensibilidade do processo de secagem foi necessário recorrer a 5 simulações com radiações incidentes constantes ao longo do tempo. Apresenta-se na figura 4.7 a configuração da simulação a efetuar, com as diferentes radiações que serão feitas incidir sobre a parede em análise.

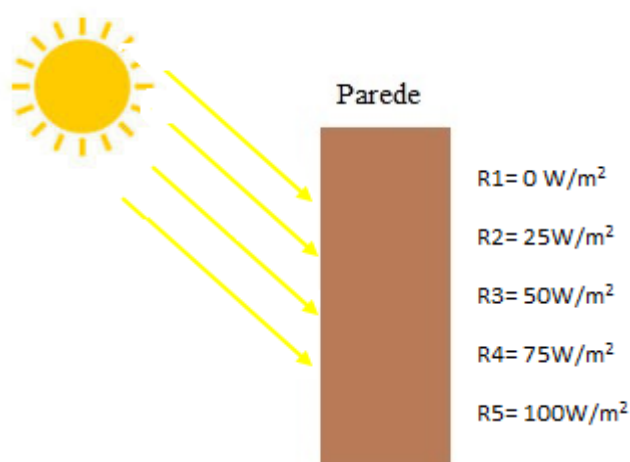


Figura 4.7- Configuração das simulações a efetuar para a radiação

Para esta análise foi tido em conta que a radiação incidente seria constante ao longo do tempo.

Como foi referido anteriormente, o programa não permite a introdução de temperaturas superiores a 50°C, como tal, devido ao facto de a radiação aumentar a temperatura da parede, houve a necessidade de testar várias simulações por forma a verificar até que valores se poderia variar a radiação na simulação base para que nenhum ponto do elemento em estudo atinja valores superiores a 50°C. Verificou-se que o máximo valor passível a ser introduzido era próximo de 150 W/m<sup>2</sup>, portanto para facilitar o tratamento numérico optou-se por utilizar valores de radiação com intervalos iguais de 25 W/m<sup>2</sup>, até atingir 100W/m<sup>2</sup>.

No quadro 4.11 encontra-se discriminado as simulações a efetuar na análise da influencia que a radiação solar tem no processo de secagem do barro vermelho e do betão celular.

Quadro 4.11 – Descrição das simulações efetuadas para a radiação.

<b>Hr<sub>ext</sub>, HR<sub>int</sub> (%)</b>	<b>T<sub>ext</sub>, T<sub>int</sub> (°C)</b>	<b>Precipitação (1-Sim/ 0- Não)</b>	<b>Radiação (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>T<sub>imi</sub> (°C)</b>	<b>U<sub>imi</sub> (Kg/Kg)</b>		<b>Ref. da simulação</b>	
					Betão C.	Barro V.	Betão c.	Barro v.
50	25	0	0	25	0,52	0,13	1BC-R	1BV-R
			25				2BC-R	2BV-R
			50				3BC-R	3BV-R
			75				4BC-R	4BV-R
			100				5BC-R	5BV-R

**\*Nota**-As simulações que se encontram referidas nas tabelas pela cor   apresentam-se no capítulo 5, sendo que as restantes se encontram em anexo.

#### 4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo tem como objetivo caraterizar os parâmetros e as simulações a realizar para o estudo da sensibilidade do processo de secagem quando sujeito a diferentes condições ambientais. Para tal foram descritas as propriedades, do betão celular e do barro vermelho, a simulação base para estudar os parâmetros ambientais, e a caraterização das simulações numéricas para cada um dos parâmetros ambientais (Humidade relativa, temperatura, precipitação e radiação) a avaliar a influência que assumem no processo de secagem para o betão celular e o barro vermelho.





# 5

## **ESTUDO DE SENSIBILIDADE DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM**

### **5.1. INTRODUÇÃO**

Este capítulo tem como objetivo analisar de que forma as condições exteriores poderão influenciar o processo de secagem através das simulações descritas no capítulo 4. Como tal procedeu-se às simulações descritas no capítulo 4. É importante realçar que apenas algumas das simulações estão presentes no corpo da dissertação, sendo que a restantes se encontram em anexo.

### **5.2. HUMIDADE RELATIVA AMBIENTE**

Para a análise de sensibilidade da influência da humidade relativa ambiente no processo de secagem foi necessário proceder a 5 simulações para cada um dos materiais, evidenciado no quadro 4.4 do subcapítulo 4.4.1.

Na figura 5.1 estão representados os perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BC-HR e 4BC-HR. Através desta figura é possível observar que o mecanismo de secagem será feito do sentido do interior do material para os nós em contacto com as superfícies, é possível também observar que, devido às condições exteriores terem sido consideradas iguais às condições interiores e os parâmetros do material nas interfaces serem idênticos, o processo de secagem é simétrico relativamente ao centro do elemento construtivo.

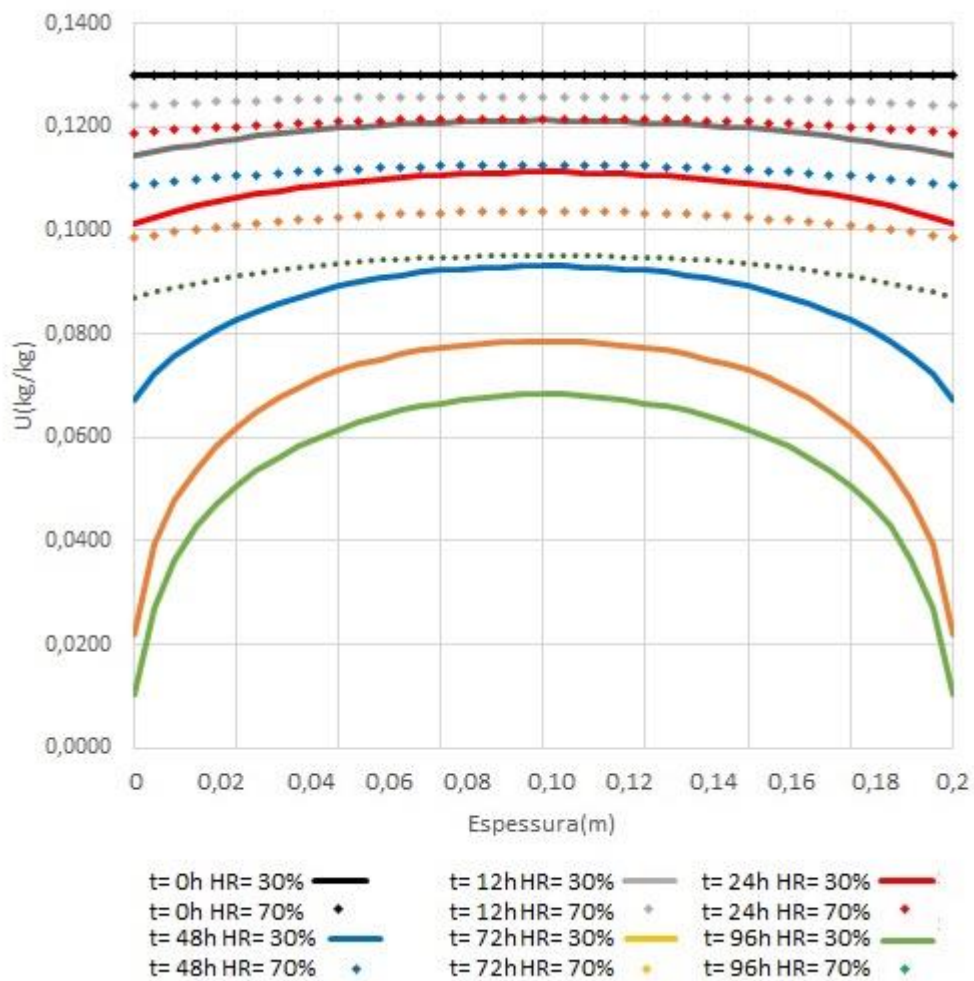


Figura 5.1 – Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-HR e 4BV-HR.

Para a análise das várias simulações foi determinado a variação proporcional do teor de humidade total (figura 5.3) e a velocidade de secagem em função do tempo (figura 5.4). A variação do teor de humidade total foi obtida através do integral da função que define o perfil do teor de humidade para o tempo requerido, que representa a área a verde da figura 5.2. Embora não represente o valor factual do teor de humidade total, a evolução obtida entre teores de humidade consecutivos é proporcional, tornando-se útil para a análise das simulações. A velocidade de secagem é obtida pela diferença entre teores de humidade consecutivos. Na figura 5.2. está apresentado a laranja, e é obtido pela diferença entre o valor representativo do teor de humidade total no instante t1 e o valor representativo do teor de humidade para t2.

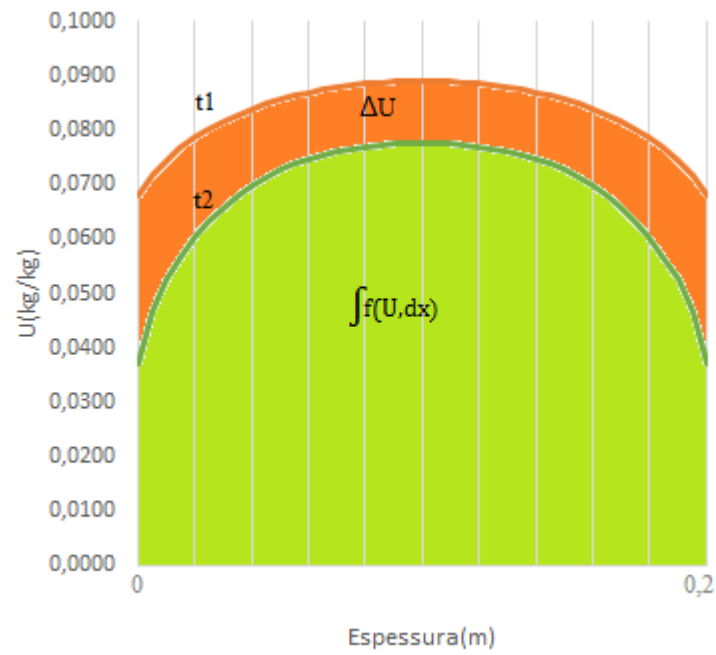


Figura 5.2- Representação da forma de cálculo para os valores representativos do teor de umidade total e da velocidade de secagem

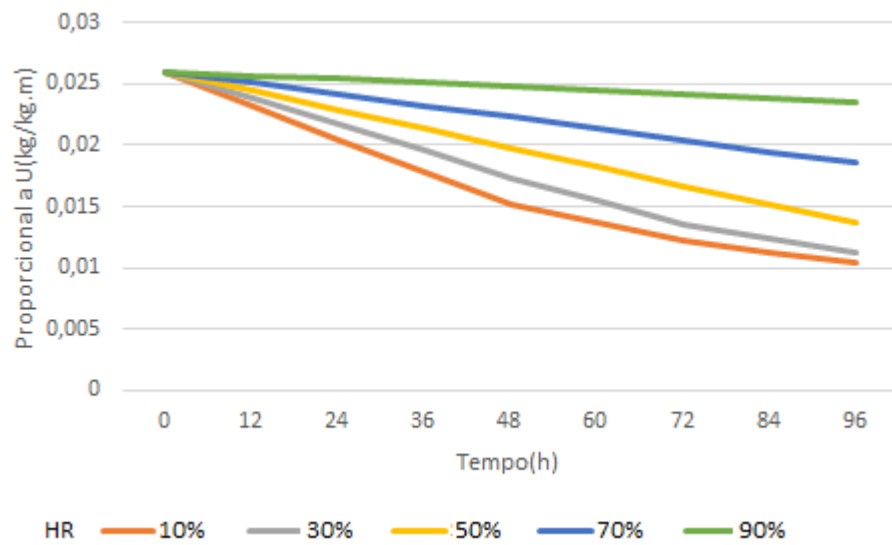


Figura 5.3 – Representação da forma como irá evoluir o teor de umidade total, do barro vermelho, para as simulações efetuadas para as diferentes HR.

É possível observar que o teor de humidade em função do tempo será tanto menor quanto menor for a humidade relativa ambiente. Também se verifica que ao longo do tempo haverá uma menor diferença entre os teores de humidade consecutivos à medida que a humidade relativa sobe, consequentemente a sensibilidade do processo de secagem, do barro vermelho, ao longo do tempo será menor para humidades relativas ambiente mais elevadas.

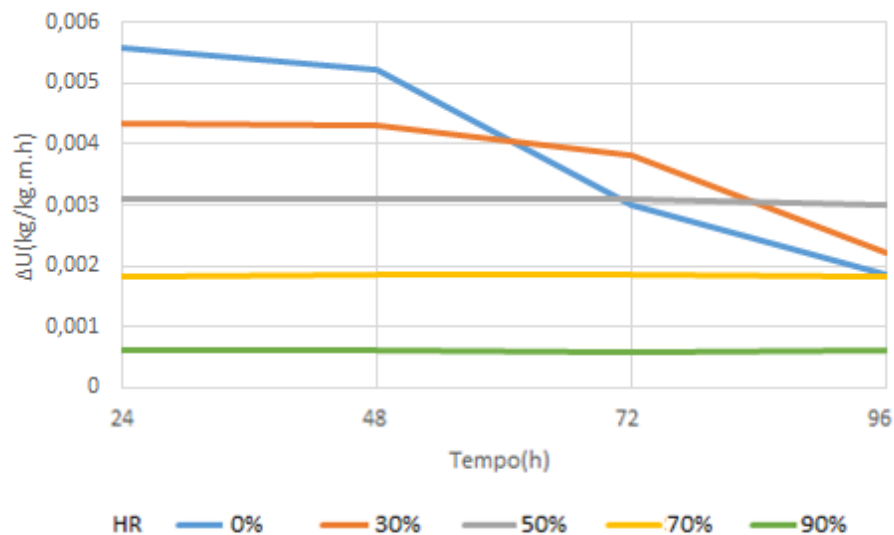


Figura 5.4 – Velocidade de secagem do barro vermelho em função das diferentes HR analisadas.

**\*Nota:** Apesar da evolução da curva que define a velocidade de secagem não variar linearmente, como foi determinada através da diferença do valor representativo do teor de humidade em intervalos de tempo, será assim representado.

É possível verificar que a velocidade de secagem é constante para as humidades relativas ambiente mais altas, e varia para as humidades relativas mais baixas. Nas primeiras horas também é possível verificar que quanto mais baixo a humidade relativa ambiente maior será a velocidade.

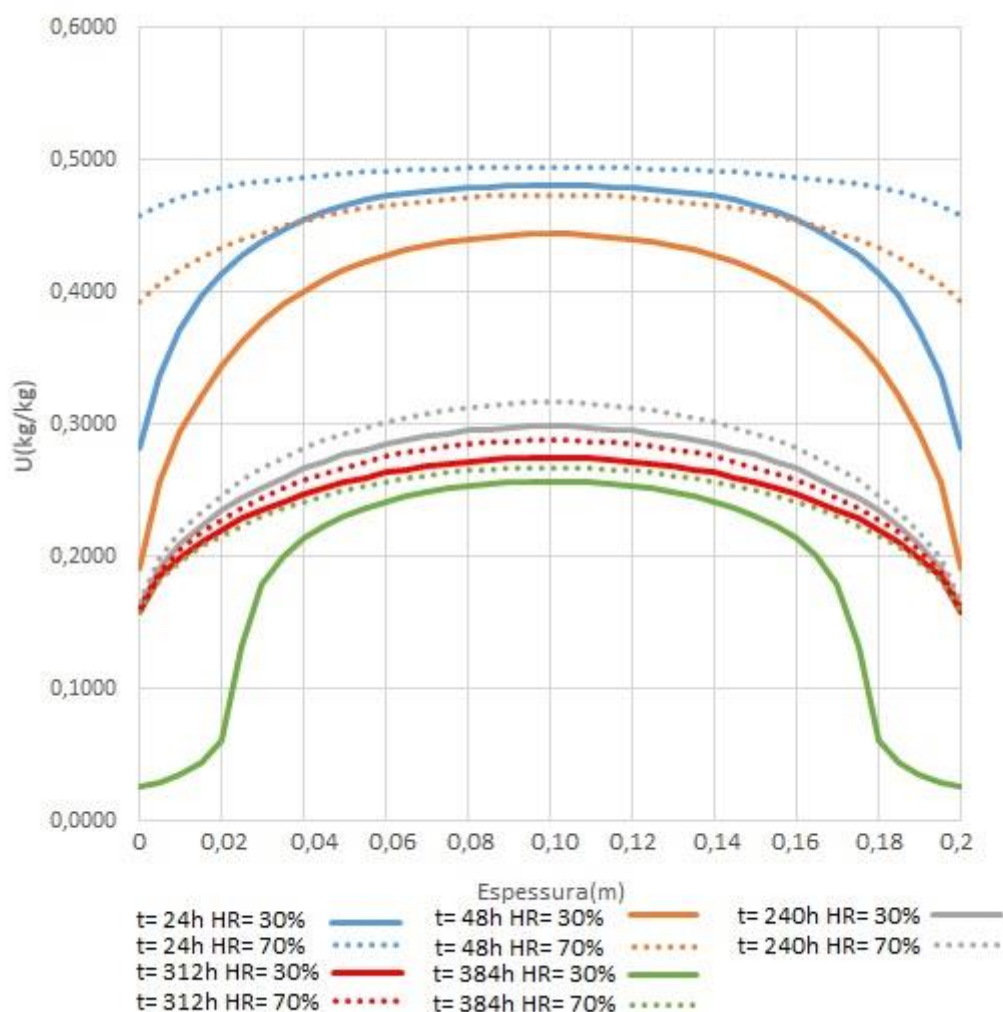


Figura 5.5- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 2BC-HR e 4BC-HR.

Apresenta-se na figura 5.5 a variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem para o betão celular para as simulações 2BC-HR e 4BC-HR, correspondentes a humidades relativas ambiente de 30% e 70% respetivamente. O comportamento do teor de humidade em função do tempo do betão celular em determinados aspetos é análogo barro vermelho. Alguns desses aspetos são o facto de o teor de humidade ser simétrico relativamente ao eixo de simetria do elemento em análise e o facto de que os perfis de humidade ao longo do betão celular, para os mesmos tempos, serão maiores para a maior HR ambiente em análise, também exemplificado na figura 5.6 relativa aos valores representativos do teor de humidade total ao longo do tempo. Também é possível verificar que tal como no barro vermelho, o betão celular possui uma sensibilidade do processo de secagem ao longo do tempo menor para temperaturas mais elevadas.

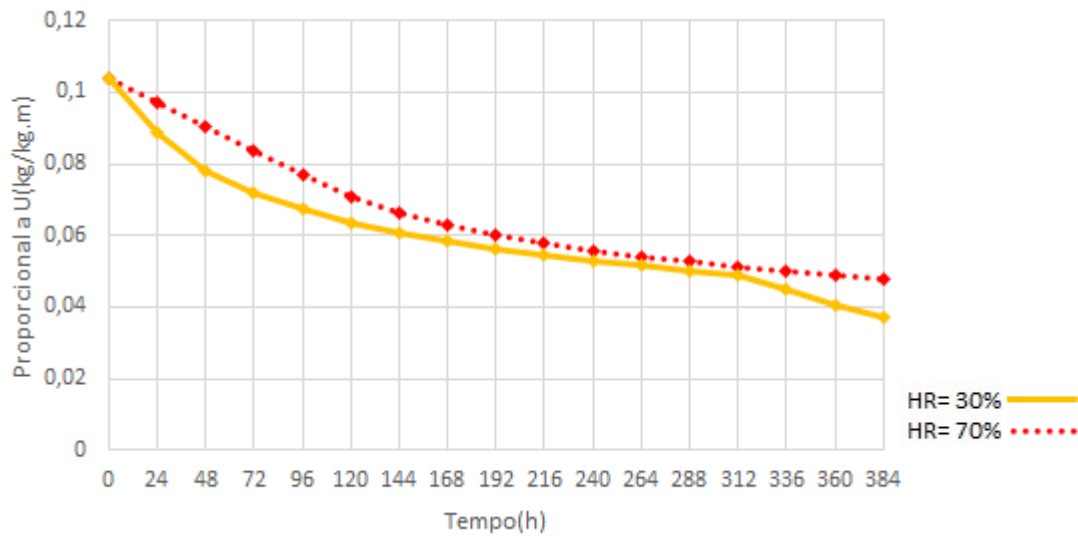


Figura 5.6- Representação da forma como irá evoluir o Teor de humidade total, do betão celular, para a HR= 30% e HR= 70%.

Na figura 5.7 está evidenciado a velocidade de secagem do betão celular para as respetivas humidades relativas ambiente em estudo. Tal como no barro vermelho, a velocidade de secagem nas primeiras 48 horas será superior para a menor humidade relativa. Porém este material apresenta algumas diferenças relativamente ao ocorrido no barro vermelho. É possível verificar que no final das 96 horas, contrariamente ao barro vermelho, o betão celular apresenta uma velocidade de secagem superior para a humidade relativa de 70%, na curva da velocidade de secagem do betão celular para a HR= 30%, ocorrerá uma aceleração do processo de secagem após 312 horas, também se verifica que na curva pertencente à HR= 70%, haverá uma transição da 1ª para a 2ª fase.

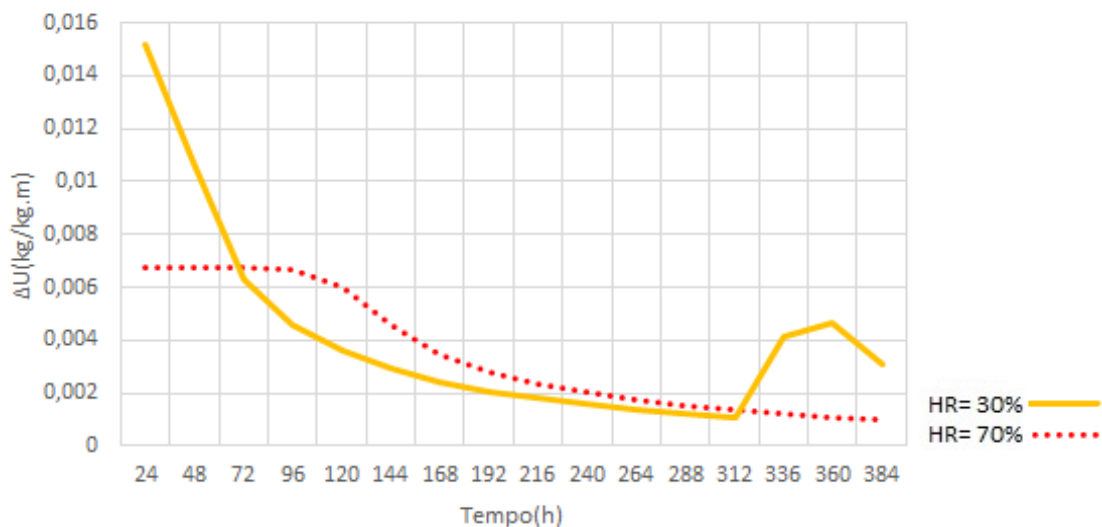


Figura 5.7 – Velocidade de secagem do betão celular para a HR= 30% e HR= 70%.

Para interpretar a velocidade de secagem é importante ter em atenção a evolução dos perfis relativos ao teor de humidade da simulação 4BC-HR, relativo a HR= 30%, apresentados na figura 5.5.

Como é possível depreender pela análise do teor de humidade ao longo do elemento, apenas os teores de humidade relativos a T= 24h estão compreendidos no domínio capilar, portanto ocorrerá a transição entre a 1ª fase de secagem e a 2ª fase de secagem e consequentemente haverá uma desaceleração devido aos teores de humidade pertencentes ao domínio capilar.

Contrariamente à secagem ocorrida na 1ª fase, onde a secagem se dá mais rapidamente nas zonas adjacentes às superfícies do material, na 2ª fase ocorre precisamente o inverso, dando-se a secagem maioritariamente nas zonas centrais do elemento. Esta situação ocorre devido ao facto de que na 1ª fase o processo de secagem é mais célere nas zonas adjacentes às superfícies, o que implica que os teores de humidade nestas zonas entrem primeiro no domínio capilar, consequentemente a velocidade de secagem nestas zonas será mais lenta. A velocidade de secagem irá diminuir em função do tempo pois a quantidade de água pertencente ao domínio capilar irá gradualmente decrescer e tender para valores quase nulos, como representado na figura 5.6.

Através da análise da figura 5.5 e 5.7 é possível verificar que aceleração no processo de secagem às 312 horas, coincide com os teores de humidade ao longo do elemento transitarem para valores inferiores a  $U_{cr}$ , consequentemente é nesta altura que o processo de secagem entra a 3ª fase. É importante ter em conta que os poros que outrora pertenciam ao domínio capilar eram responsáveis por redistribuir de forma mais célere a humidade, baixando o teor de humidade nas zonas do centro do elemento, mas, devido à redistribuição da humidade ser feita por capilaridade e nas zonas adjacentes à interface se fazer por difusão, não permite aos poros pertencentes às proximidades dos nós em contacto com as superfícies reduzirem significativamente o teor de humidade. Quando o elemento entra na 3ª fase o transporte faz-se todo através de vapor, e a velocidade de secagem será feita, tal como na 1ª fase, do exterior para o interior, provocando uma secagem mais rápida do material nas proximidades das superfícies, provocando a aceleração às 312 horas, que há medida que tende para o interior volta a perder velocidade pois a frente húmida encontra-se mais longe da superfície exterior e interior.

### **5.3. TEMPERATURA AMBIENTE**

Para o conhecimento da sensibilidade do processo de secagem em função da temperatura ambiente foram efetuadas 7 simulações, para cada um dos materiais, apresentas no subcapítulo 4.4.2. Na figura 5.8 é representado as variações dos perfis do teor de humidade ao longo do elemento construtivo, neste caso o barro vermelho, em função de T= 10°C e T= 40°C que corresponde às simulações 2BV-T e 6BV-T.

É possível observar que os teores de humidade respetivos à temperatura de 40°C serão superiores ao longo do tempo comparativamente à temperatura de 10°C. Tal como no caso da análise da sensibilidade do processo de secagem em função da humidade relativa, o processo de secagem procede-se do interior do material para o exterior, como também se verifica que o gráfico é simétrico em relação ao eixo de simetria do elemento, pois os parâmetros do material nos nós em contacto com a superfície exterior e interior e as condições ambientais a que estão sujeitas são consideradas idênticas.



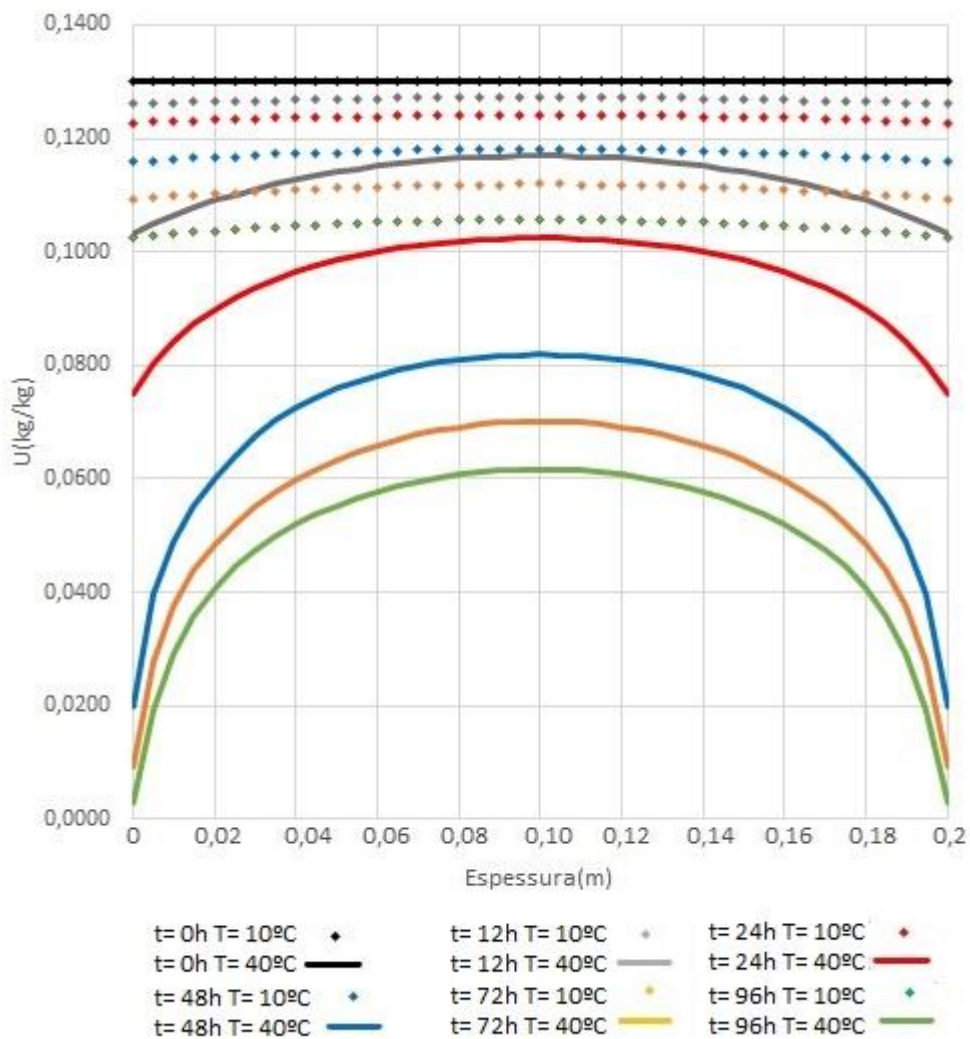


Figura 5.8- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-T e 6BV-T.

Através da análise da figura 5.9, é possível verificar que, para as 96 horas analisadas, quanto maior a temperatura menor será o teor de humidade em função do tempo. A diferença entre os consecutivos teores de humidade no final das simulações será gradualmente menor, o que implica que a sensibilidade do processo de secagem ao longo do tempo será maior para variações de temperaturas baixas.

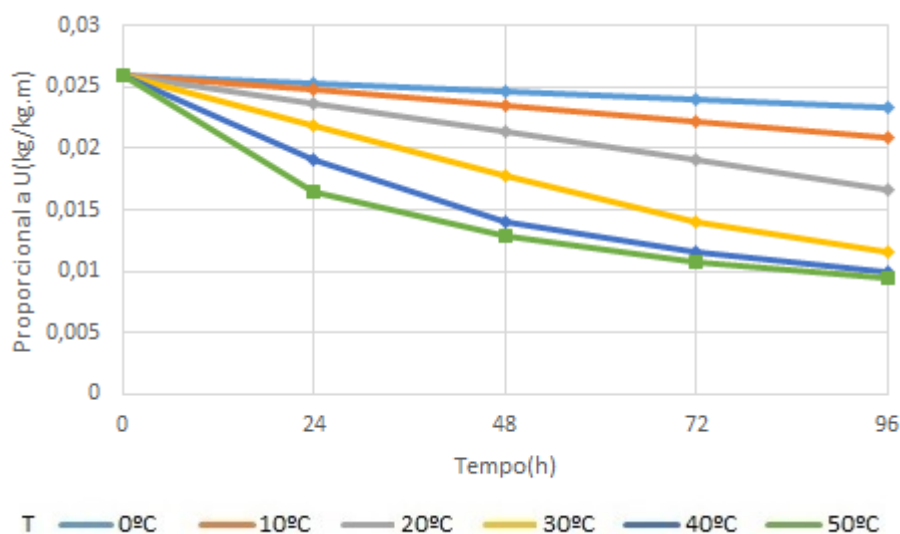


Figura 5.9 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, relativo às simulações efetuadas para diferentes temperaturas.

Apesar de ser possível constatar, através da figura 5.10, que quanto maior for a temperatura maior será a velocidade de secagem nas primeiras 24 horas, verifica-se que para as temperaturas de 50°C, 40°C e 30°C haverá uma desaceleração do processo de secagem em tempos diferentes.

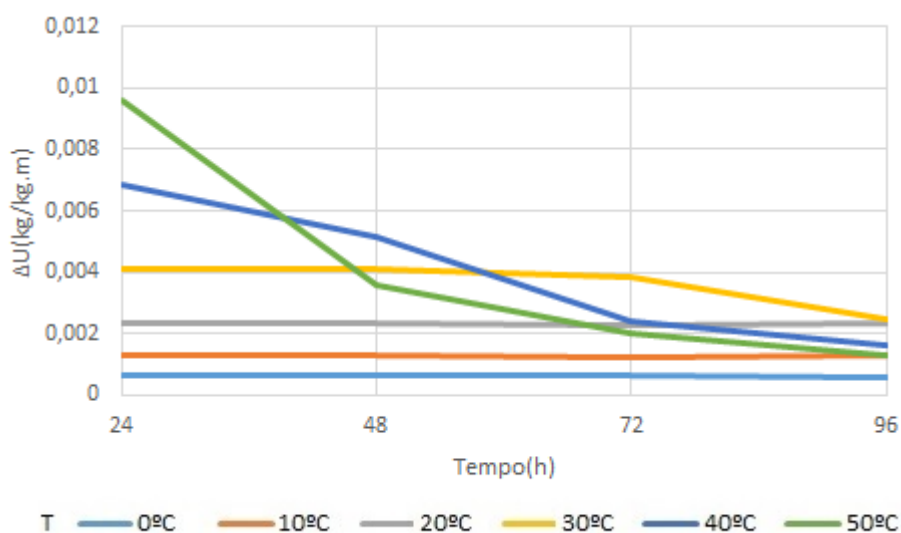


Figura 5.10 – Velocidade de secagem do barro vermelho em função da temperatura.

Na figura 5.11 está representado a variação dos perfis do teor de humidade durante o processo de secagem para as temperaturas ambiente de 10°C e 40°C no betão celular. Tal como verificado no barro vermelho, quanto maior for a temperatura menor será o teor de humidade ao longo do tempo analisado, assim como o teor de humidade total ao longo do tempo e a maior sensibilidade do processo de secagem quando sujeito a variações de temperaturas baixas ao longo do tempo, de acordo com os valores representativos dos teores de humidade total apresentados na figura 5.12.

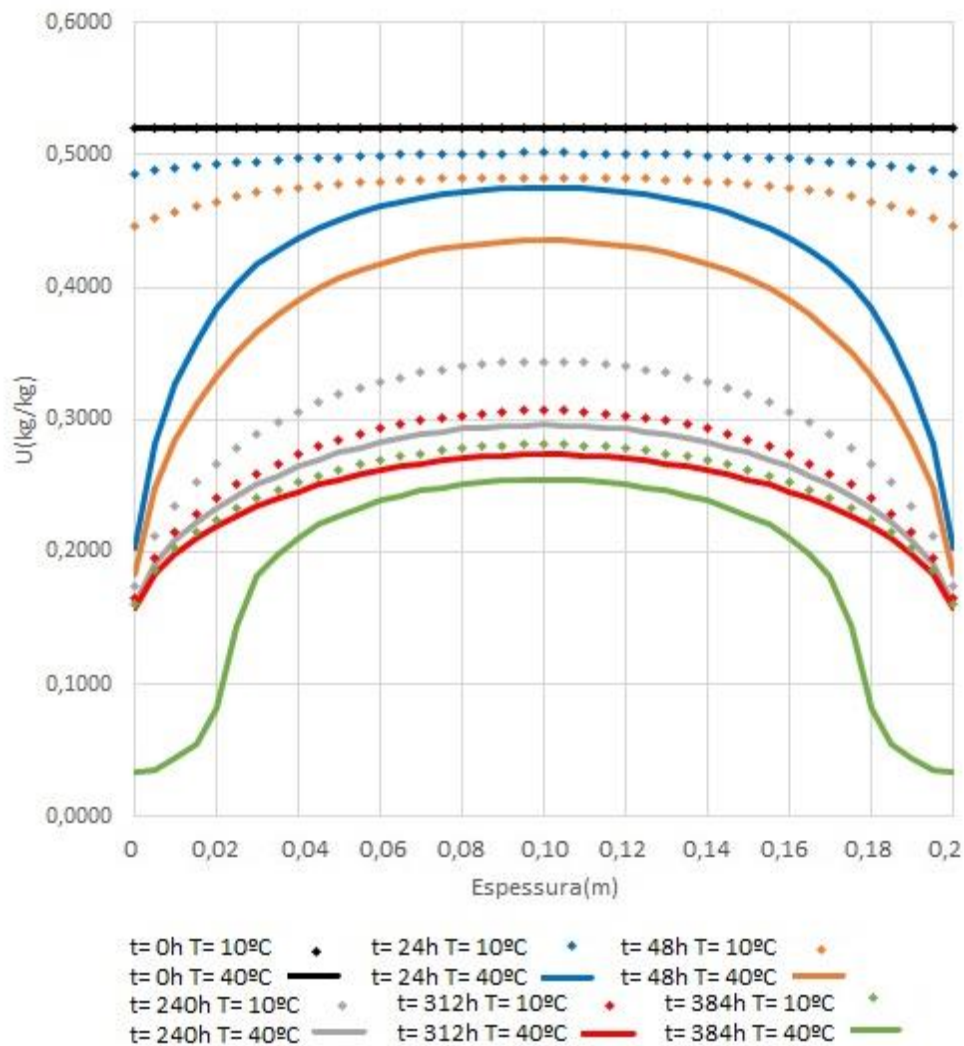


Figura 5.11- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 2BC-T e 6BC-T

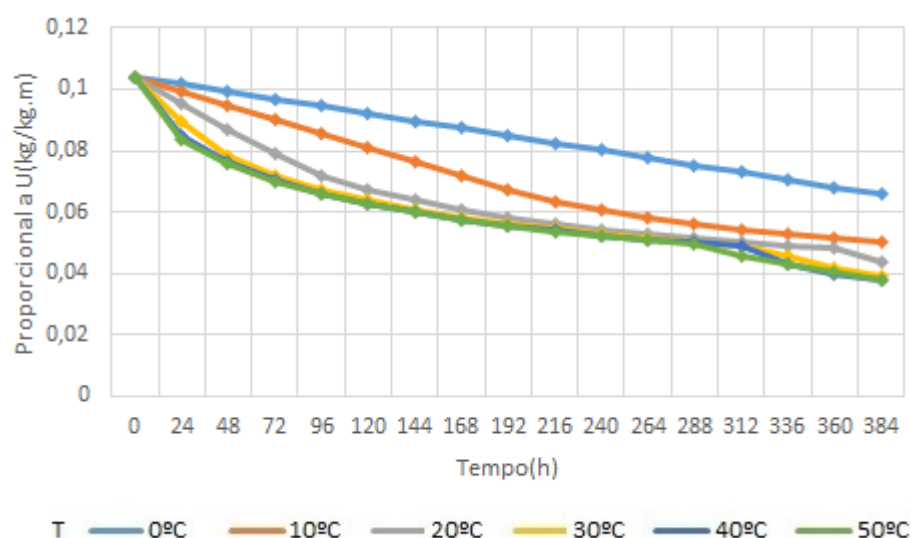


Figura 5.12 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para as simulações efetuadas respetivo às diferentes temperaturas.

Como demonstrado na figura 5.13, o processo de secagem será semelhante ao ocorrido nas simulações respetivas à análise da sensibilidade do processo de secagem face à variação da humidade relativa. Como é possível verificar, a curva que define a velocidade para a simulação 2BC-HR, quando HR= 30%, é semelhante à curva descrita na simulação 6BC-T, para T= 40°C, e a simulação 4BC-HR, para HR= 70%, semelhante à simulação 2BC-T, para T= 10°C. Por consequente a explicação do desenvolvimento do processo de secagem é igual para as respetivas curvas da velocidade de secagem semelhantes.

É possível então perceber que para T= 40°C, o processo de secagem irá passar pelas três fases de secagem. Observando a figura 5.11, relativa aos teores de humidade ao longo do betão celular, verifica-se que a transição da primeira fase para a segunda fase ocorre ainda nas primeiras 24 horas, e na figura 5.14, através da verificação do tempo ao qual corresponde um novo aceleração do processo de secagem, como referido anteriormente representa o tempo em que o processo de secagem inicia a 3ª fase, que a 3ª fase se inicia às 312 horas.

Relativamente à simulação para T= 10°C, o processo de secagem apenas ocorrerá por capilaridade, na primeira fase, e por vapor e capilaridade na segunda. Na figura 5.11 apenas é possível verificar que a transição ocorre entre as 48 horas, quando os teores de humidade pertencem todos ao domínio capilar, e as 240 horas, que é o intervalo seguidamente analisado onde encontramos valores pertencentes ao domínio capilar e higroscópico. Ainda nesta figura é possível verificar que a partir das 168 horas a velocidade de secagem começa a diminuir, consequentemente será nesta fase em que os teores de humidade adjacentes às interfaces entram no domínio higroscópico e iniciar-se-á a 2ª fase de secagem.

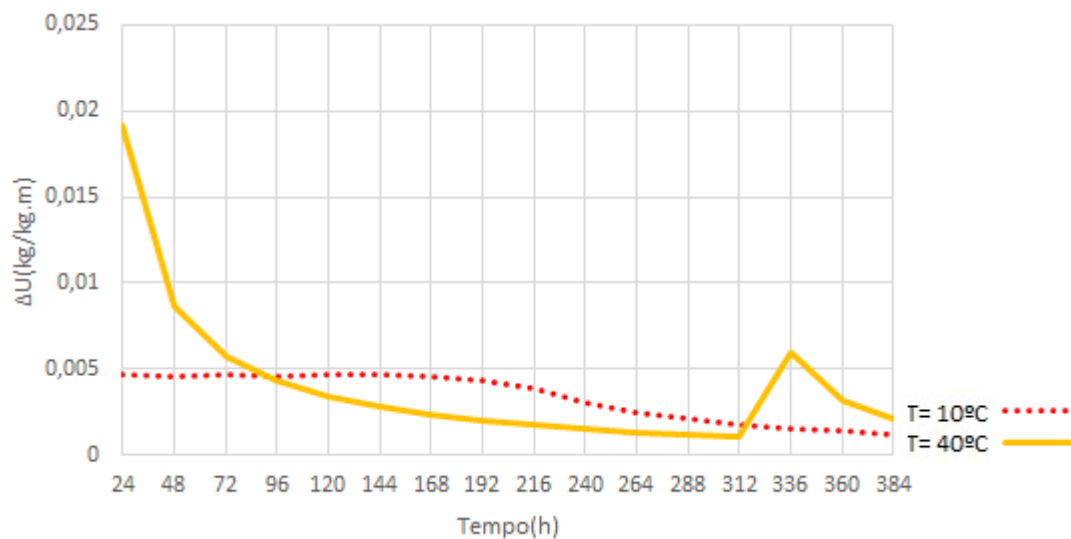


Figura 5.13 – Velocidade de secagem do betão celular em função da Temperatura.

#### 5.4. PRECIPITAÇÃO

A avaliação da influência da precipitação no processo de secagem foi efetuada com base em três diferentes tipos de intensidade para cada um dos materiais. Na figura 5.14 representa-se o perfil transversal do barro vermelho em função do teor de humidade ao longo dos diferentes tempos de análise para as simulações BV-1P e BV-3P, correspondentes a intensidades de precipitação fraca e forte respetivamente.

Através da análise da figura 5.14 e da figura 5.15 é possível observar que o teor de humidade para os respetivos tempos será superior quanto mais forte for a intensidade da precipitação. Também é possível verificar que neste caso a secagem se dá sobretudo no sentido do exterior para o interior, isto deve-se ao facto da interface exterior estar sujeita a períodos de precipitação. Ainda nesta figura é possível observar que para a precipitação de intensidade fraca, às 12 horas, o perfil do teor de humidade nos nós em contacto com a exterior decresce. Para entender esta ocorrência é necessário ter em consideração que no instante em que é introduzida a precipitação, o TRHUMIDADE considera que o teor de humidade nos nós em contacto com a superfície exterior é igual ao teor de humidade de saturação para esse mesmo instante. Como a intensidade de precipitação fraca ocorre de 8 em 8 horas, o perfil de intensidade fraca das 8 horas até às 16 horas não está sujeita a precipitação, consequentemente o teor de humidade junto à interface exterior do elemento irá decrescer até que ocorra nova precipitação. É devido a este facto que o teor de humidade relativo às 12 horas de precipitação fraca decresce relativamente aos restantes, sendo que ocorre precipitação nos períodos correspondentes aos outros perfis.

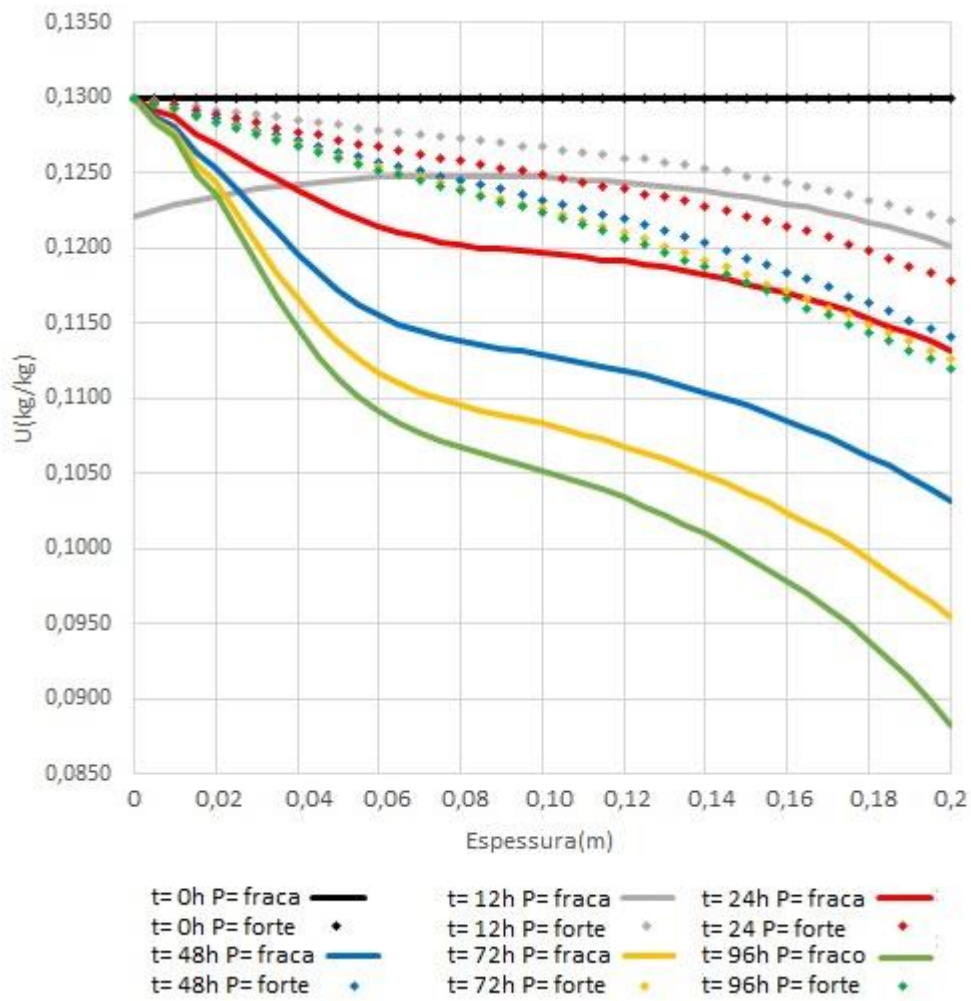


Figura 5.14- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 1BV-P e 3BV-T.

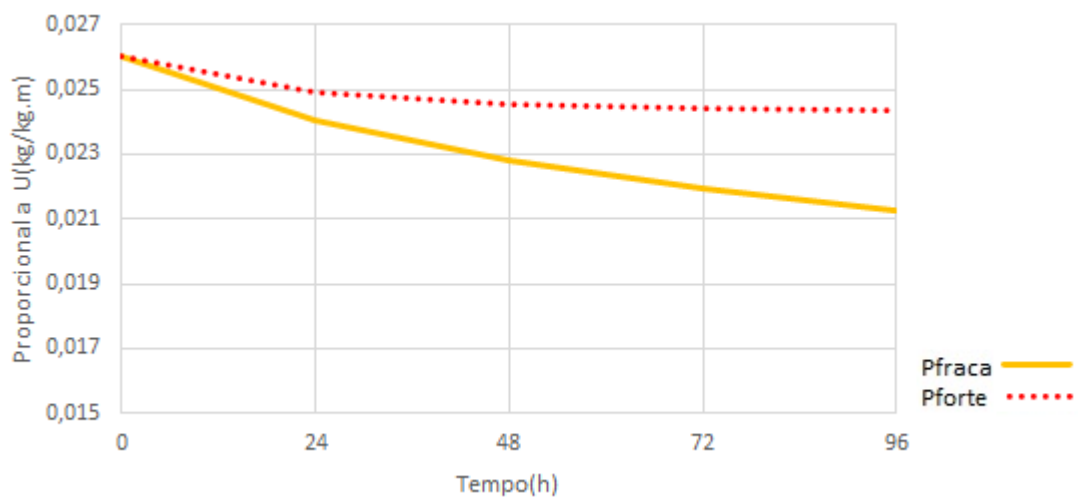


Figura 5.15 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, para as simulações efetuadas para  $P=fraca$  e  $P=forte$ .

Na figura 5.16 apresenta-se a velocidade de secagem do barro vermelho em função a temperatura. A análise desta figura revela que para a precipitação forte a velocidade de secagem ao longo do tempo tende para valores próximos de zero. Consequentemente a quantidade de água transferida para o exterior é progressivamente menor e tende para um equilíbrio com a quantidade de água absorvida. Esta ocorrência deve-se ao facto de numa fase inicial a interface interior não estar sujeita à precipitação, dando-se uma secagem inicial mais célere, posteriormente a capacidade de transferir água para o exterior, apesar de se fazer praticamente apenas por capilaridade, tenderá a ser igual à capacidade de água absorvida, pois o elemento está recorrentemente a absorver e transferir para o interior do material a água proveniente do exterior. É possível verificar que quanto mais próximo da interface exterior menor será a diferença entre os teores de humidade consecutivos.

A principal diferença entre as duas precipitações ocorre devido ao facto de a precipitação de intensidade fraca ter um período mais longo que não está sujeita à chuva, tendo por consequente mais tempo para secar e apresentando por isso teores de humidade menores ao longo do tempo.

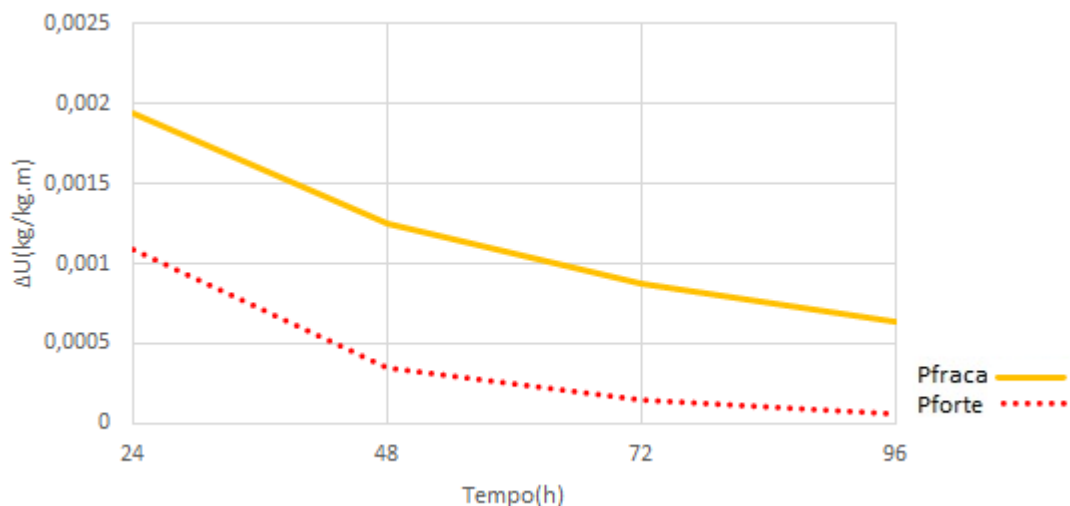


Figura 5.16 – Velocidade de secagem do barro vermelho em função da precipitação.

Na figura 5.17 é apresentado a variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as intensidades de precipitação fraca e forte. Como é possível observar a evolução dos perfis dos diferentes teores de humidade apresenta uma configuração diferente do barro vermelho. Apesar de ser possível retirar algumas ilações idênticas, tais como o teor de humidade baixar em função da intensidade da precipitação, como demonstrado na figura 5.17 e na figura 5.18, e como o processo de secagem ocorre da interface interior para a exterior, também é visível que para intensidades idênticas precipitadas, a variação dos teores de humidade apresenta uma configuração diferente.



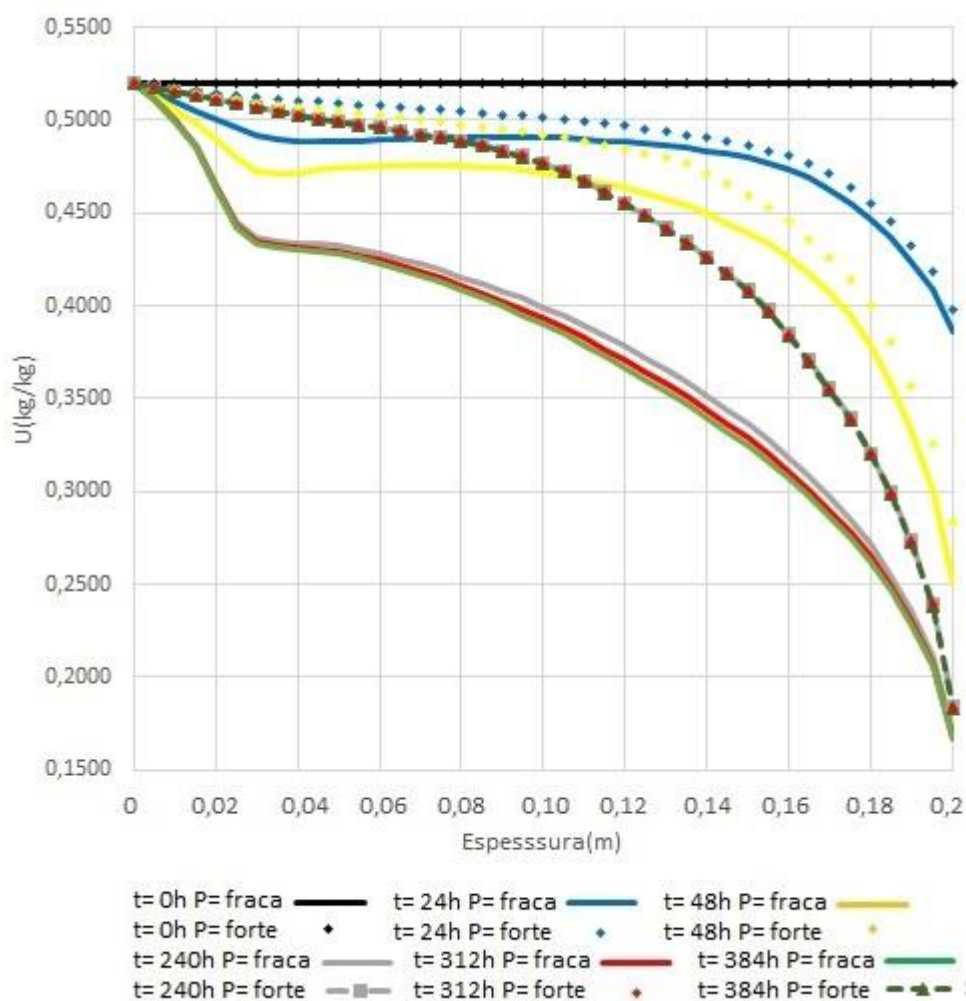


Figura 5.17- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 1BC-P e 3BC-T.

Pode-se verificar que os teores de humidade nas proximidades da superfície interior, para ambas as simulações, são inferiores a  $U_{cr}$  a partir de  $t = 48h$ , logo a partir deste tempo ambas as simulações se encontram na segunda fase de secagem. Este facto para além do mencionado relativo à precipitação de intensidade forte do barro vermelho, explicam o porquê de a velocidade de secagem, apresentado na figura 5.19, tender para valores nulos em ambas as simulações relativas ao betão celular.

A principal diferença entre as duas precipitações ocorre devido ao facto de a precipitação de intensidade fraca ter um período mais longo que não está sujeita à chuva, tendo por consequente mais tempo para secar e apresentando por isso teores de humidade menores ao longo do tempo.

É possível verificar que ao final das 96 horas, para a precipitação de intensidade forte, o barro vermelha já se encontra com velocidades muito mais próximas de zero que o betão celular.



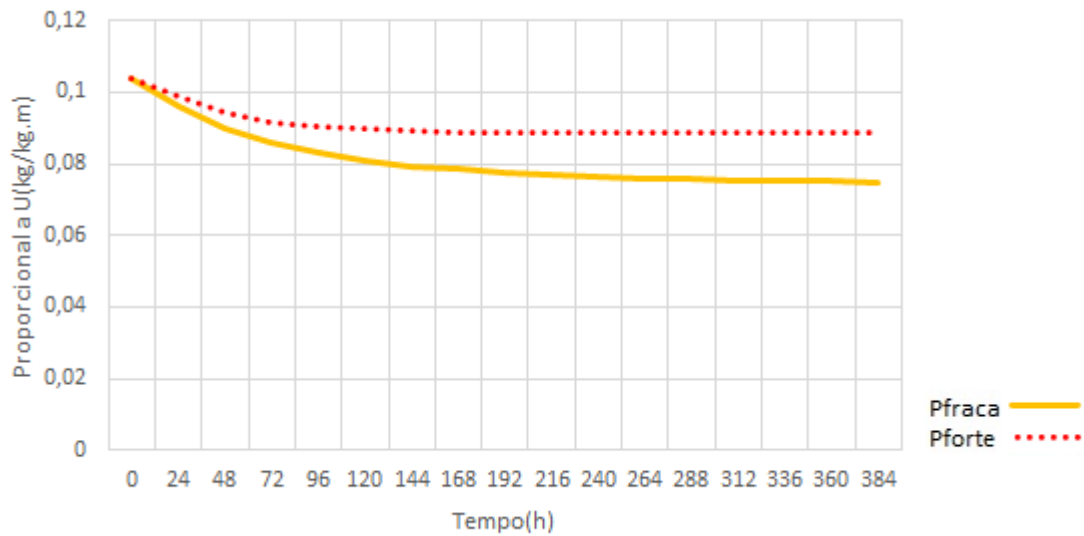


Figura 5.18 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para as simulações efetuadas para P= fraca e P= forte.

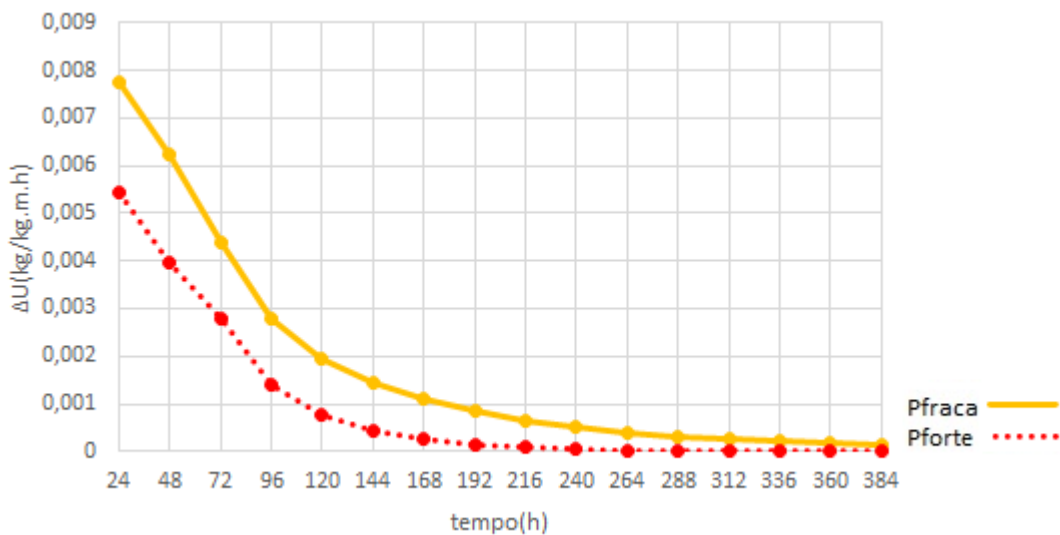


Figura 5.19– Velocidade de secagem do betão celular em função da precipitação.

## 5.5. RADIAÇÃO

Para a análise de sensibilidade da influência da radiação solar no processo de secagem foi necessário proceder a 5 simulações para cada um dos materiais, evidenciado no quadro 4.11 do subcapítulo 4.4.4.

Na figura 5.20 está representado o perfil transversal do barro vermelho em função do teor de humidade para diferentes tempos, as simulações presentes dizem respeito há simulação 2BV-R e 4BV-R.

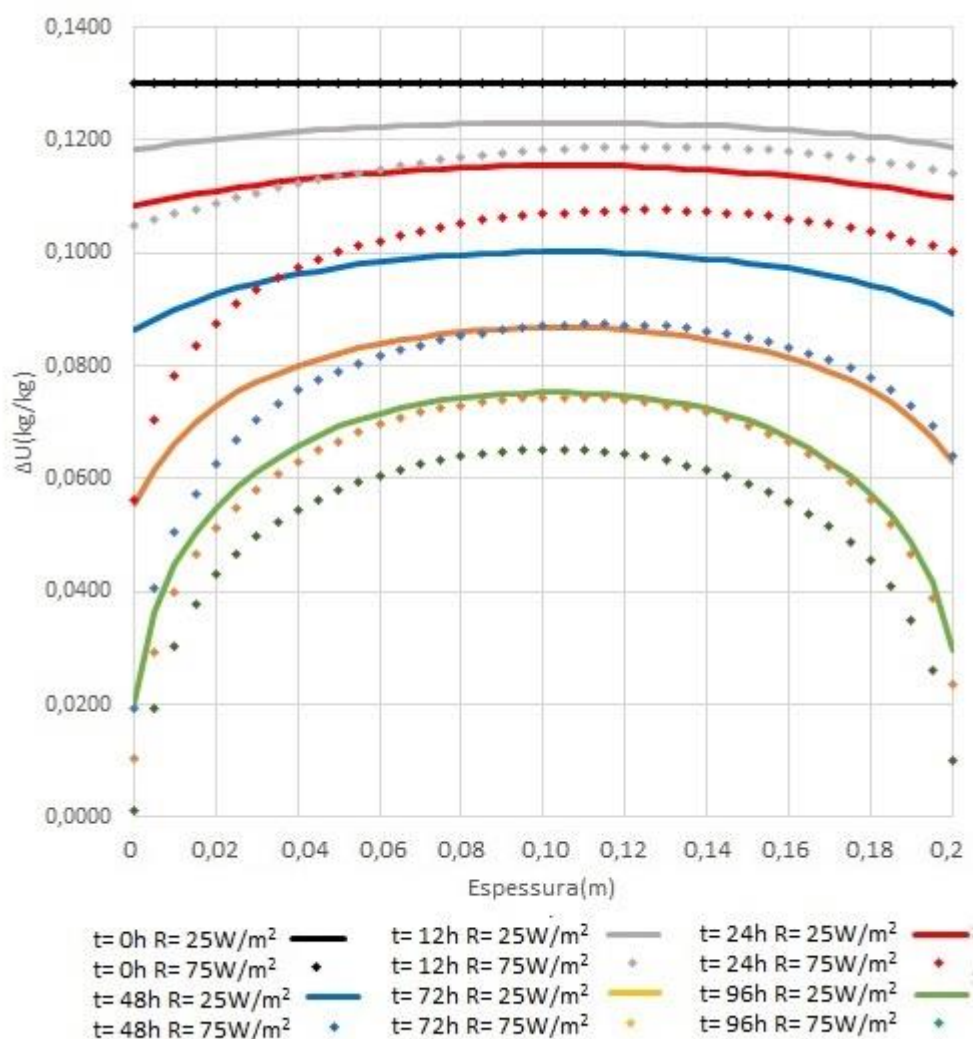


Figura 5.20- Variação dos perfis de umidade durante o processo de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-R e 4BV-R

Através da análise da figura 5.19 e da figura 5.22 é possível interpretar que quanto maior for a radiação incidente menor será o teor de umidade ao longo do material. Também é possível concluir que o processo de secagem se desenvolve mais rapidamente da superfície exterior para o interior do material comparativamente à secagem da superfície interior para o interior do material. Para compreender o porquê desta ocorrência apresenta-se a figura 5.21 com o desenvolvimento das temperaturas.

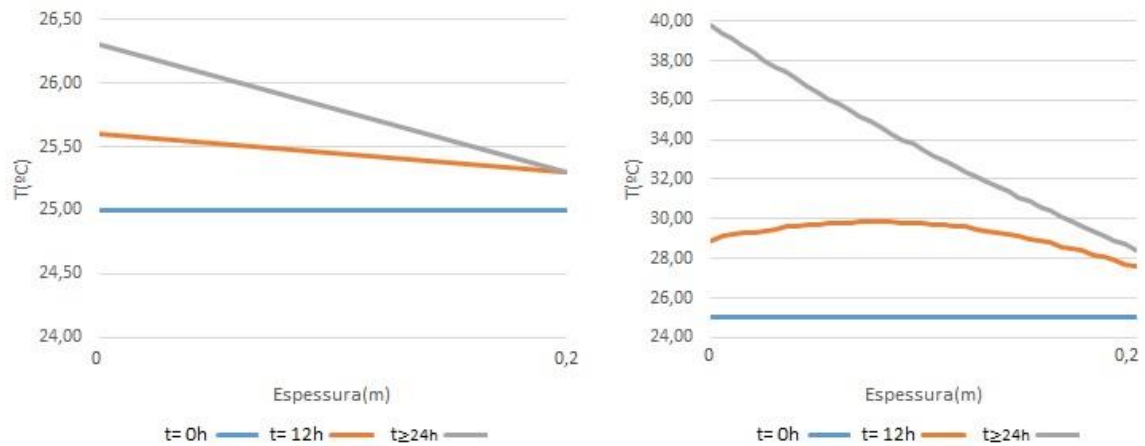


Figura 5.21- Variação da temperatura ao longo do elemento construtivo na simulação 1BV-R e 4BV-R respetivamente

É possível verificar que quanto maior for a radiação solar incidente na superfície exterior do elemento mais elevado será a temperatura ao longo do perfil. Porém é preciso ter em consideração que, para além da radiação só incidir na face exterior, o elemento está sujeito às condições de simulação base, onde a temperatura exterior e interior são iguais a 25°C. Tendo em consideração estes fatores a temperatura entrará em equilíbrio térmico após as primeiras 24 horas de exposição e manter-se-á no decorrer da simulação, é importante realçar que a temperatura de equilíbrio térmico irá diminuir de uma forma aproximadamente linear, do exterior para o interior, pois a interface interior não está sujeita a radiação solar, consequentemente está em contacto apenas com a ambiência de 25°C.

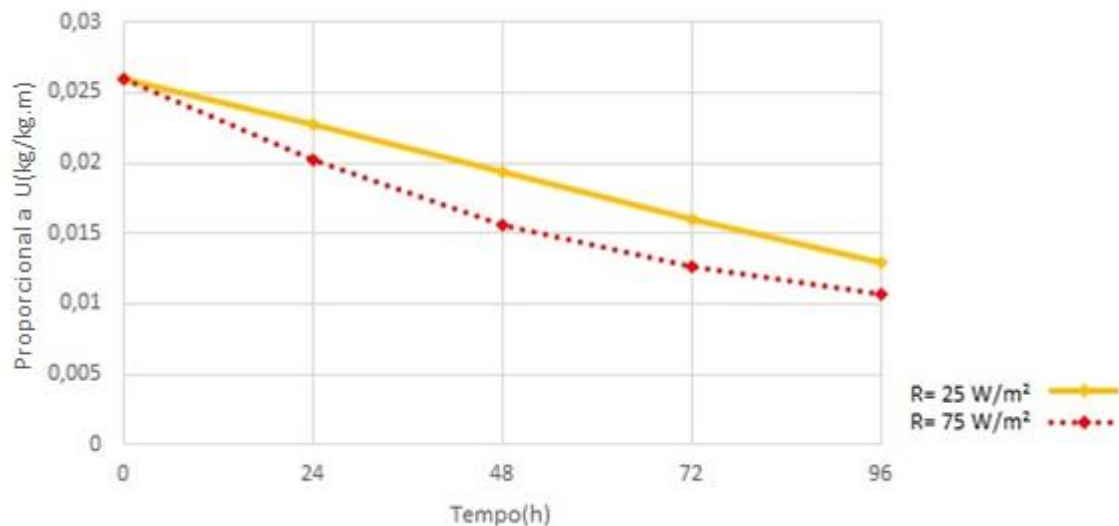


Figura 5.22 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do barro vermelho, para a simulações 2BV-R e 4BV-R.

O comportamento da sensibilidade do processo de secagem do barro vermelho em função da radiação de certa maneira é concomitante com o comportamento analisado para a temperatura pois a radiação irá alterar a temperatura a que o material está sujeito. Porém este comportamento não é igual pois a radiação provoca diferentes temperaturas ao longo do elemento. Tendo em conta que a temperatura é decrescente da superfície exterior para a superfície interior provoca consequentemente uma maior velocidade de secagem da interface exterior para o interior do material que da interface interior para o interior do material, fazendo com que a frente húmida esteja mais próxima da interface interior que do exterior.

Na figura 5.23 é possível observar que a velocidade de secagem para radiação de  $75 \text{ W/m}^2$ , nas primeiras 48 horas, é superior à velocidade de secagem para  $25 \text{ W/m}^2$ . Uma razão exequível para este acontecimento é devido ao facto de que quanto maior a radiação, maior a temperatura e consequentemente a velocidade inicial de secagem, que na 1ª fase se procede principalmente por capilaridade. Como a velocidade de secagem é maior, mais rapidamente os poros vão ficando vazios e o transporte por capilaridade torna-se menos célere, é devido a este fator que a velocidade de secagem para a simulação 2BV-R se torna superior a 4BV-R.

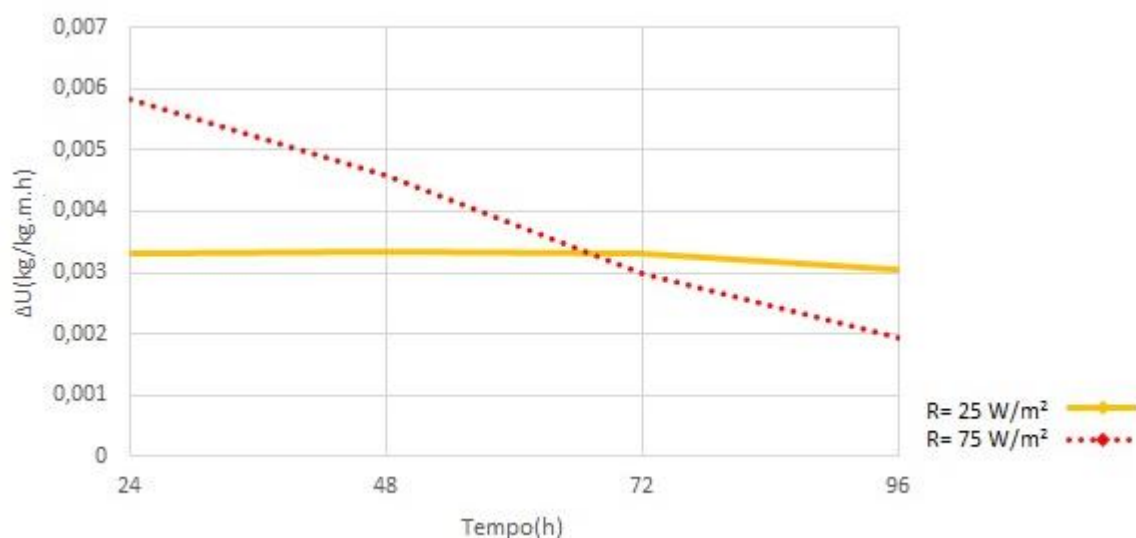


Figura 5.23 – Velocidade de secagem do barro vermelho para as simulações 2BV-R e 4BC-R.

Na figura 5.24 está representado o perfil transversal do betão celular em função do teor de humidade para diferentes tempos, as simulações presentes dizem respeito há simulação BC2-R e BC-4-R.

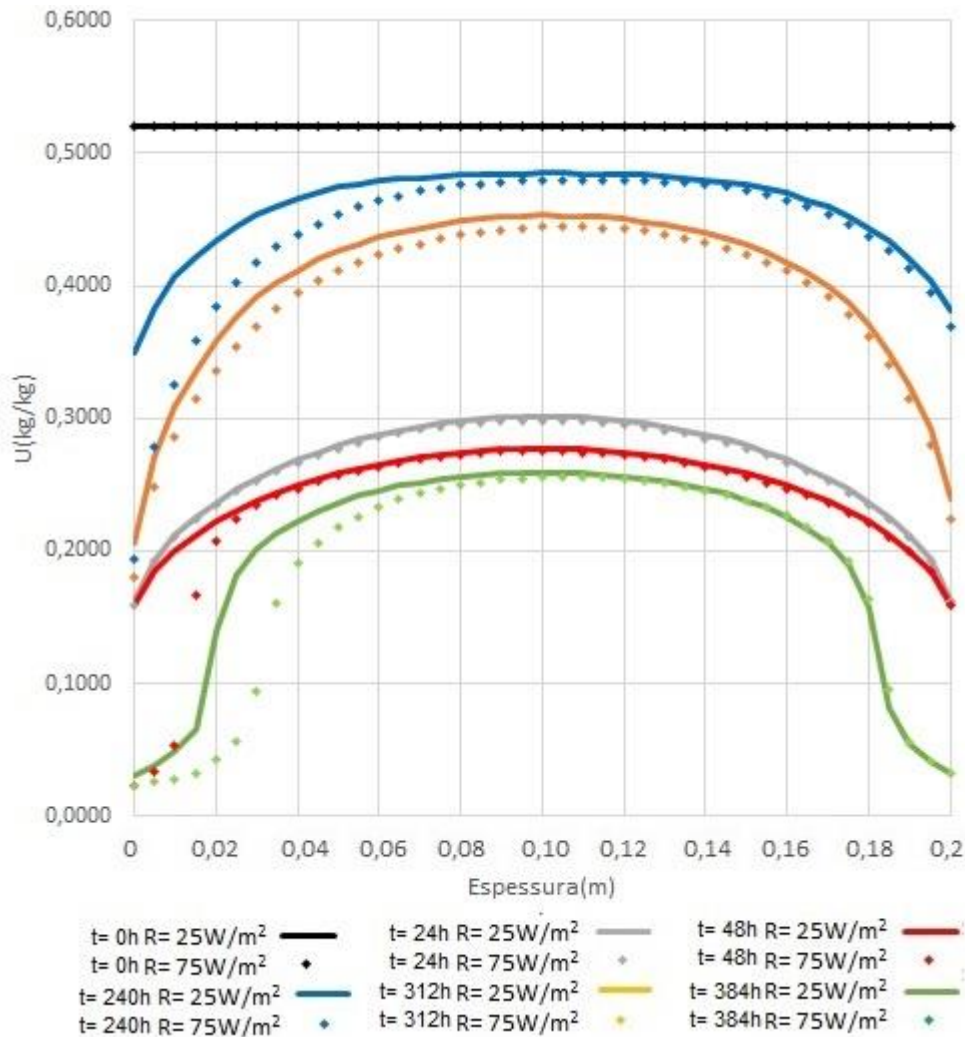


Figura 5.24- Variação dos perfis de humidade durante o processo de secagem do betão celular para as simulações 2BC-R e 4BC-R

Como é possível verificar através da figura 5.24 e na figura 5.26, existem semelhanças com o processo de secagem ocorrido no barro vermelho. Tais como quanto maior for a radiação incidente menor o teor de humidade ao longo do material e o desenvolvimento do processo de secagem se proceder mais rapidamente da superfície exterior para o interior do material comparativamente à secagem da superfície interior para o interior do material.

Como apresentado na figura 5.25 a variação da temperatura face à radiação de 75 ( $W/m^2$ ), faz com que a temperatura varie da superfície exterior para o interior aproximadamente dos 40°C aos 26°C. Tal como foi referido no subcapítulo 5.2, referente à análise de sensibilidade do processo de secagem relativamente à temperatura, o betão celular apresenta uma pequena sensibilidade a alterações de temperaturas altas, pelo que consequentemente não irá alterar significativamente os valores dos teores de humidade total ao longo do elemento entre a simulação respetivo à radiação de 75 ( $W/m^2$ ) e a de 25 ( $W/m^2$ ).

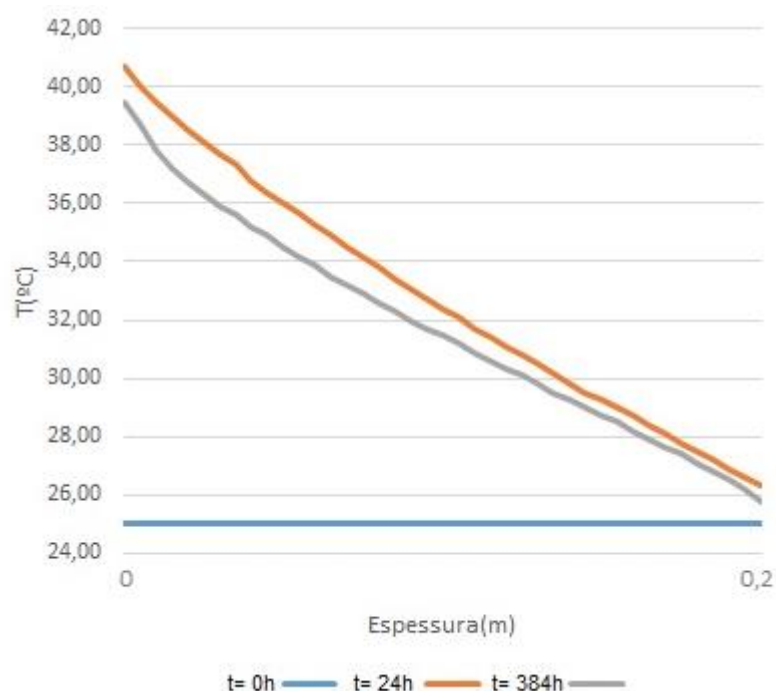


Figura 5.25 – Variação da temperatura ao longo do elemento construtivo na simulação 2BV-R e 4BV-R

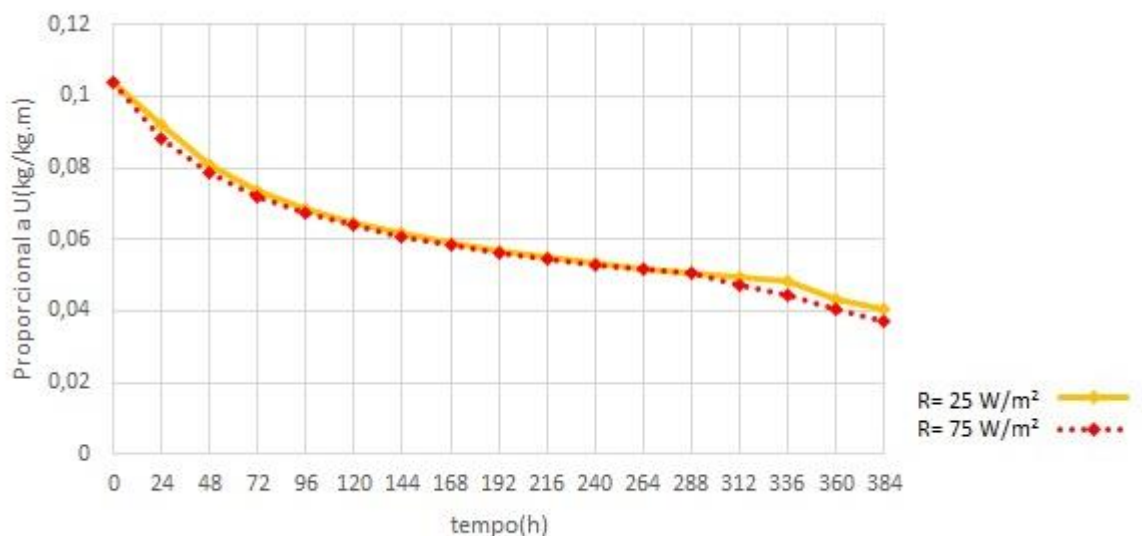


Figura 5.26 – Representação da forma como irá evoluir o teor de humidade total, do betão celular, para as radiações de  $25 \text{ (W/m}^2\text{)}$  e  $75 \text{ (W/m}^2\text{)}$

Relativamente ao processo de secagem é análogo ao apresentado na simulação 6BC-T, a diferença entre as radiações de  $25 \text{ (W/m}^2\text{)}$  e de  $75 \text{ (W/m}^2\text{)}$ , é que nas primeiras horas, para a segunda radiação, a velocidade de secagem é um pouco superior o que irá implicar que o pico característico da transição da 2ª para a 3ª fase ocorra antes, representado na figura 5.27.

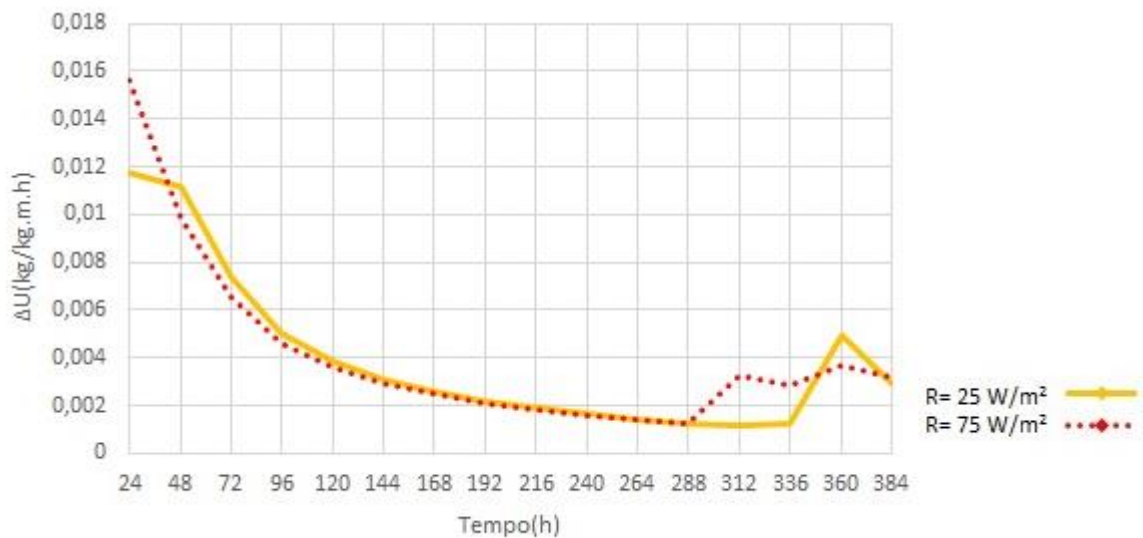


Figura 5.27 – Velocidade de secagem do betão celular para as simulações BC2-R e BC4-R.

## 5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Através do estudo realizado das simulações efetuadas com o programa TRHUMIDADE sobre a sensibilidade do processo de secagem que o barro vermelho e o betão celular apresentam face à variação da humidade relativa ambiente, da temperatura ambiente, da precipitação e da precipitação, foi possível retirar as seguintes conclusões principais:

### Humidade relativa ambiente

- Quanto maior for a humidade relativa ambiente em contacto com o elemento construtivo mais lento será o processo de secagem ao longo do tempo.
- A velocidade de secagem nas primeiras 24 horas será tanto maior quanto menor for a humidade relativa em contacto com o material.
- Ambos os materiais apresentam uma menor sensibilidade no processo de secagem para humidades relativas ambiente mais baixas.
- É possível verificar a ocorrência das três fases de secagem quando o betão celular está sujeito a HR= 30%

### Temperatura ambiente:

- Quanto menores forem as temperaturas em contacto com o elemento maiores serão os teores de humidade ao longo do tempo.
- A velocidade de secagem nas primeiras 24 horas será tanto maior quanto maior a temperatura ambiente.
- Ambos os materiais apresentam uma menor sensibilidade no processo de secagem para temperaturas altas.
- O betão celular para a temperatura de 40° irá passar pelas três fases de secagem, enquanto para a temperatura de 10° passará pelas duas primeiras.

#### Precipitação:

- O processo de secagem nestas simulações procedesse no sentido da interface interior.
- Quanto maior for a intensidade precipitada mais lento será o processo de secagem ao longo do tempo.
- A velocidade de secagem decresce até que no processo de secagem ocorra um equilíbrio entre a capacidade que o material tem de transferir humidade para o exterior e a quantidade de água absorvida pela precipitação.
- O betão celular a partir de determinado momento apresenta uma velocidade de secagem nula, comparativamente a outras simulações efetuadas esta situação decorre precocemente

#### Radiação:

- Quanto maior a radiação incidente no material menor serão os teores de humidade ao longo do tempo.
- A radiação incidente irá aumentar a temperatura do material. Será decrescente, aproximadamente linear, do da interface exterior para a interior. Este facto faz com que a sensibilidade do processo de secagem tenha semelhanças com as análises efetuadas para a temperatura.
- Apesar da temperatura variar significativamente, como os materiais apresentam uma baixa sensibilidade no processo de secagem para temperaturas altas, então irão ter por consequente uma baixa sensibilidade para variações da radiação.

#### Análise de sensibilidade:

- A sensibilidade do processo de secagem face a variações de humidades relativas baixas é maior comparativamente a variações de humidade relativa altas.
- Para variações de temperaturas mais baixas maior será a sensibilidade do processo de secagem.
- Relativamente à precipitação devido ao facto do programa não contabilizar a intensidade precipitada apenas foi possível verificar que o barro vermelho tem uma maior sensibilidade no processo de secagem.
- A sensibilidade do processo de secagem face a variações da radiação irá depender sobretudo da temperatura a que o material se encontra, sendo que quanto menor for a temperatura que se encontra maior será a sensibilidade do processo de secagem face a variações da radiação.
- Os parâmetros estudados que têm maior influência no processo de secagem é a humidade relativa e a temperatura, sendo este ultimo o que apresenta maior sensibilidade no processo de secagem.





# 6

## Conclusões

### 6.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

No final deste trabalho foi possível retirar várias ilações quanto ao processo de secagem:

- O processo de secagem de nos elementos construtivos em várias circunstâncias é prejudicial ao comportamento dos edifícios e é a causa para o aparecimento de várias patologias, portanto requer um estudo cuidado e continuo devido à crescente complexidade dos materiais que compõe as paredes;
- O processo de secagem em materiais porosos apresenta três fases de secagem, a primeira por capilaridade, a segunda por capilaridade e difusão de vapor e a terceira apenas por difusão de vapor, sendo que a velocidade irá decrescer da 1ª para a 3ª fase;
- O modelo matemático que está na base do programa de cálculo, TRHUMIDADE, foi criado por *Luikov e Philip- De Vries*, o modelo permite estudar em conjunto a transferência de humidade, em fase líquida e vapor, e a transferência de calor;
- Apesar da aparente complexidade do programa de cálculo, é de relativamente intuitivo;
- Para proceder ao estudo do processo de secagem foi necessário criar uma simulação base, característica de ambiente laboratorial, por forma a avaliar individualmente cada um dos parâmetros ambientais estudados;
- Verificou-se que quanto maior a humidade relativa ambiente mais lento se desenvolverá o processo de secagem;
- Quanto menor for a temperatura ambiente maior serão os teores de humidade ao longo do tempo;
- Relativamente à precipitação verificou-se que, a velocidade de secagem será decrescente até que ocorra um equilíbrio entre a capacidade que o material tem de absorver a água da chuva e a capacidade que têm em transferir humidade para o exterior;
- Quando os materiais estão sujeitos a radiações altas apresentam uma variação significativa na temperatura, que será decrescente da interface exterior para a interface interior, porém como os materiais apresentam uma baixa sensibilidade no processo de secagem para a variação entre temperaturas altas, então não ocorre uma diferença muito significativa entre os teores de humidade ao longo do tempo.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

O estudo da sensibilidade das condições fronteira no processo de secagem com o programa de cálculo TRHUMIDADE, permitiu retirar várias conclusões sobre determinados parâmetros ambientais. Porém, ainda poderão ser feitos vários trabalhos neste âmbito:

- Seria interessante criar uma base de dados com os dados climatéricos relativos a vários climas de diferentes regiões;
- A forma como é contabilizada a precipitação pode ser melhorada, de forma a que seja possível introduzir um dado valor da chuva incidente;
- O programa não possibilita o estudo de múltiplas interfaces, seria uma das aplicações que poderia ser desenvolvida;
- Aumentar a base de dados do TRHUMIDADE, que para até ao momento ainda só apresenta o betão celular e o barro vermelho;
- Avaliar a influência das características dos materiais no processo de secagem;
- Continuar a desenvolver o estudo da influência que os parâmetros ambientais têm no processo de secagem. Existe uma vasta quantidade de simulações que se podem realizar que devido ao tempo limitado para a execução da presente dissertação não foi possível realizar. Também poderão ser avaliados outros fatores ambientais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. S. Guimarães, V. P. de Freitas, J. M. P. Q. Delgado, e T. Rego. *The Interface Effect in the Water Absorption in Ceramic*. Energy procedia, vol 78, n. April 2016, pp 1395-1400, 2015.
- [2] M. Abuku, B. Blocken, e S. Roels. *Moisture response of building facades to wind-driven rain: Field measurements compared with numerical simulations*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 97, n. 5–6, pp. 197–207, 2009.
- [3] E. Barreira. *Avaliação da cinética de secagem do tijolo cerâmico*, pp. 165–170, 2015.
- [4] D. D. Time. *Industrial drying*, pp. 1–7, 2013.
- [5] A. S. Mujumda. *Industrial Transfer*, Department of Mechanical Engineering National University of Singapore, 2012.
- [6] V. de Freitas, A. S. Guimarães, e M. I. Torres. *Humidade Ascensional*, FEUP edições, Porto, 2008.
- [7] V. P. de Freitas. *Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios*, Faculdade de Engenharia Universitária do Porto, 1992.
- [8] J. M. F. de Castro. *Estudo experimental da secagem do betão celular*, pp. 1–8, Faculdade de Engenharia do Porto, 1998.
- [9] Krischer. *Technique du Séchage*, Trad, CETIAT.
- [10] B. Sazhin. *Principles of Drying Techniques*, vol. 22, n. 2. pp. 203–208, 2005.
- [11] A. S. Panchariya, PC, D Popovic. *Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 22, n. 2. pp. 203–208, 2005.
- [12] A. S. Panchariya, PC, D Popovic. *Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying*. J. food Eng. 52, vol. 2, pp. 349–57, 2002.
- [13] A. Kuitche, E. M, e T. G. *Influence of Pre-Treatment on Drying on the Drying Kinetic of a Local Okro (Hibiscus Ersculentus) Variety*. World J. Dairy Food Sci. 2, vol. 2, pp. 83–88, 2007.
- [14] P.Junior e P. Correa. *Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão*. Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient., vol. 3, n. 3, pp. 349–353, 1999.
- [15] J. Crank. *The Mathematics of Diffusion*, vol. 2nd. Clare, 1975.
- [16] E. Barreira, J. Delgado, e V. de Freitas. *Wetting and Drying of Building Materials*. 2014 Título da Comunicação em itálico. 2014.
- [17] C. L. Hii, C. L. Law, e M. Cloke, *Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Cocoa Beans During Artificial and Natural Drying*. Journal of Food Engineering, vol. 3, n. 1. pp. 1–10, 2008.
- [18] C. . et all Hii. *Modelling of drying kinetics of single apricot*. Journal of Food Engineering Science and Techonlogy 3, pp. 1–10, 2008.
- [19] A. Kuitche, M. Edoun, e G. Takamte. *Influence of Pre-treatment on Drying on the Drying Kinetic of A Local Okro (Hibiscus ersculentus) Variety*, World Journal of Dairy & Food Sciences, vol. 2, n. 2. pp. 83–88, 2007.
- [20] A. Taheri-garavand, S. Rafiee, e A. Keyhani. *Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions*. International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, vol. 2, n. 2. pp. 147–160, 2011.

- [21] A. de S. Coutinho. *Fabrico e Propriedades do betão*, vol. 1, LNEC, 1988.
- [22] J. S. Coutinho. *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*, Faculdade de Engenharia Universitária do Porto, 1998.
- [23] *Durable Concrète Structures, CEB 183*, 1992.
- [24] <https://www.engenhariacivil.com/modelacao-comportamento-diferido-estruturas-betao>. 2017.
- [25] J. S. Coutinho. *Materiais de Construção 1- Madeiras*, 1999.
- [26] J. C. Sampaio, *Apontamentos das aulas Teóricas Materiais de Construção*, Faculdade de Engenharia Universitária do Porto, 1975.
- [27] A. P. . Galvão e I. P. Jankowsky. *Secagem racional da madeira*, São Paulo: Nobel, 1985.
- [28] R. H. PONCE e L. T. WATAI. *Manual de secagem da madeira*, São Paulo, IPT/STI. Brasília, 1985.
- [29] F. M. A. Henrique. *Humidade em Paredes*, LNEC, Lisboa, 2001.
- [30] J. da Silva. *Humidade na Construção - Síntese das Causas e Estratégias de Reabilitação*, Universidade de Coimbra, 2010.
- [31] A. S. Mujundar. *Handbook of Industrial Drying*, Taylor & Francis, New York, 2007.
- [32] <http://www.promasjetmill.com/vacuum-tray-dryers.html>. 2017.
- [33] <http://www.ashokamachines.com/process-equipment/coolers-dryers.html>». 2017.
- [34] F. G. et al Branco. *Avaliação experimental do tempo de secagem de argamassas de agregados leves*, Coimbra, 2007.
- [35] L. Pel, K. Kopinga, K. Niesel, e D. Hoffmann. *Moisture transpost in porous building materials*, Heron, pp. 593–597, 1996.
- [36] A. et al Moropoulou. *Drying Kinetics of Some Building Materials*, vol. 22, n. 2. pp. 203–208, 2005.
- [37] M. Krus e A. Holm. *Simple Methods To Approximate the Liquid Transport Coefficients Describing the Absorption and Drying*, 5th Symposium ‘Building Physics in the Nordic Countries’, Göteborg. pp. 241–248, 1999.
- [38] R. Fauconnier. *Etude des transferts simultanés de chaleur et d’humidité dans les parois multicouches. Application à la modélisation du comportement hygrothermiques des locaux en régime varié- Annexe Propriétés hygrothermiques des matériaux de construction*». Direction de la recherche UTI, Saint-Rémy-les Chevreuse, 1982.Sítio da Internet (URL completo). Data de acesso.
- [39] V. Abrantes. *Análise numérica e experimental do Comportamento térmico de coberturas com desvão*. FEUP, Porto, 1984.

## **Anexo 1**

GUIA

Ficheiro INTDADOS – barro vermelho

```

1
0.20 3 0.005 1925.00 0920.00 0.000
90 01 01 00.00
90 01 05 04.00
0.0000011 25.00 25.00 0.00300 0.00300 0000.0 0180.0 0042.0
0008.0 0180.0 0000.5
0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+
00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
0.000e+00 0.000e+00
    
```

1							
2	3	4	5	6	7		
14	15	16	17				
18	19	20	21				
22	23	24	25	26	27	28	29
30	31	32					
33	34	35	36	37	38		
39	40	41	42				

- 1 – Número de camadas
- 2,8 – Espessura da camada i (m)
- 3,9 – Código da camada i
- 4,10 – Distância entre dois nós sucessivos da malha de cálculo  $\Delta x$  da camada i (m)
- 5,11 – Massa volúmica seca da camada i ( $\text{kg/m}^3$ )
- 6,12 – Calor específico da camada i ( $\text{J/kg.K}$ )
- 7,13 – Existência ou não de espaço de ar (1/0)
- 14 – Ano do início da simulação
- 15 – Mês do início da simulação
- 16 – Dia do início da simulação
- 17 – Hora do início da simulação
- 18 – Ano do fim da simulação
- 19 – Mês do fim da simulação
- 20 – Dia do fim da simulação
- 21 – Hora do fim da simulação
- 22 – Erro máximo entre iterações sucessivas
- 23 – Condutância térmica superficial exterior –  $h_e$  ( $\text{W/m}^2.\text{°C}$ )
- 24 – Condutância térmica superficial interior –  $h_i$  ( $\text{W/m}^2.\text{°C}$ )
- 25 – Coeficiente de transferência superficial de humidade exterior –  $\beta_e$  (m/s)
- 26 – Coeficiente de transferência superficial de humidade interior –  $\beta_i$  (m/s)
- 27 – Velocidade do vento (m/s)
- 28 – Direção do vento
- 29 – Latitude do lugar
- 30 – Longitude
- 31 – Orientação da parede
- 32 – Coeficiente de absorção da parede –  $\alpha$
- 33 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 1 para o material 2 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 34 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 1 para o material 3 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 35 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 2 para o material 3 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 36 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 2 para o material 1 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 37 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 3 para o material 2 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 38 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 3 para o material 1 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 39 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 1 para o material 1 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 40 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 2 para o material 2 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 41 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 3 para o material 3 ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )
- 42 – Fluxo máximo transmitido na interface quando há um espaço de ar ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )

### Ficheiro SOLIN e SOLIT– betão celular

[illegible][illegible]

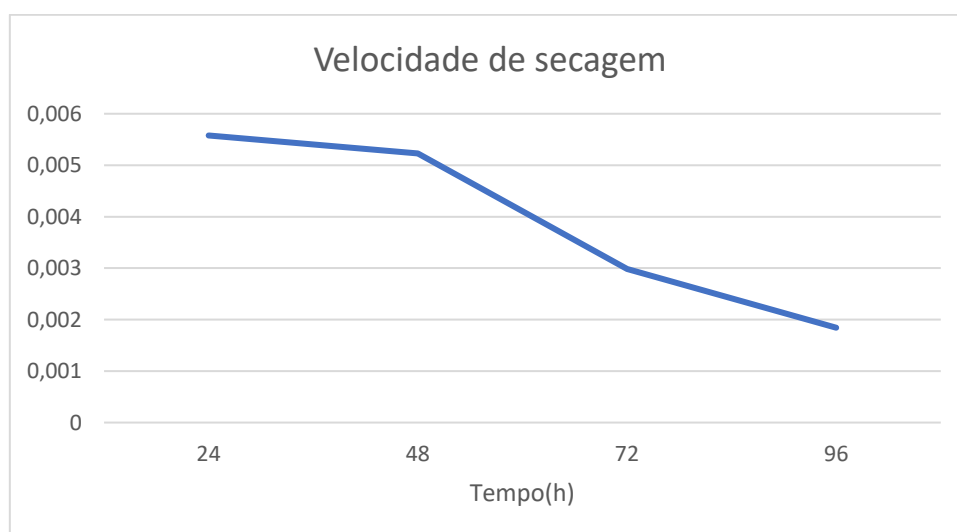
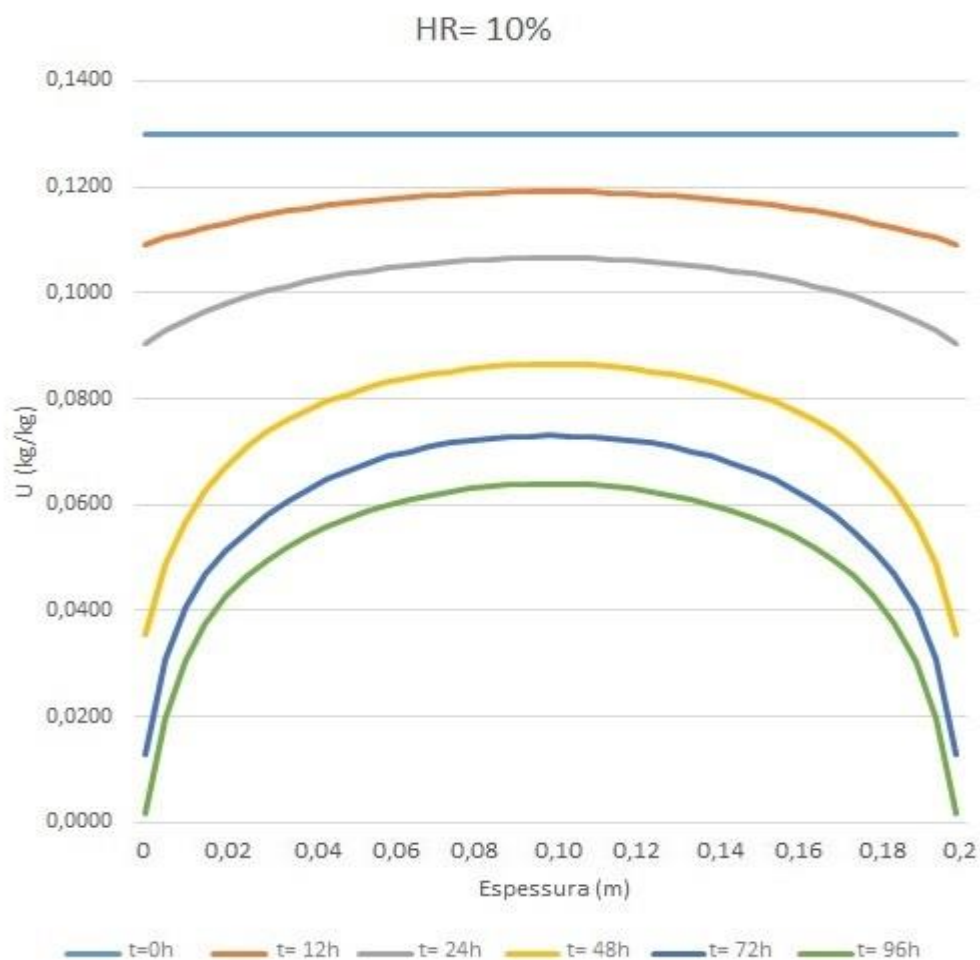


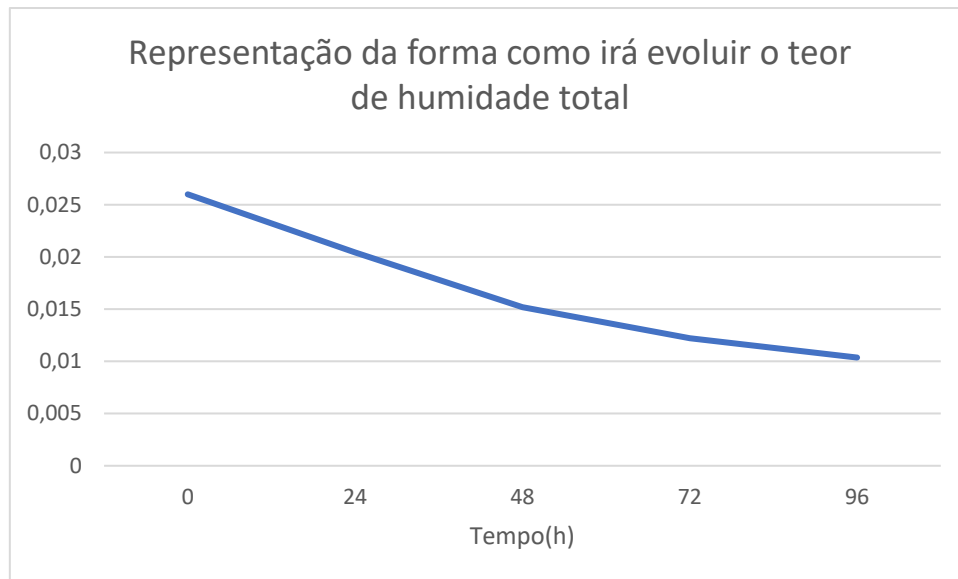
## **Anexo 2**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA HUMIDADE RELATIVA  
AMBIENTE NA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM

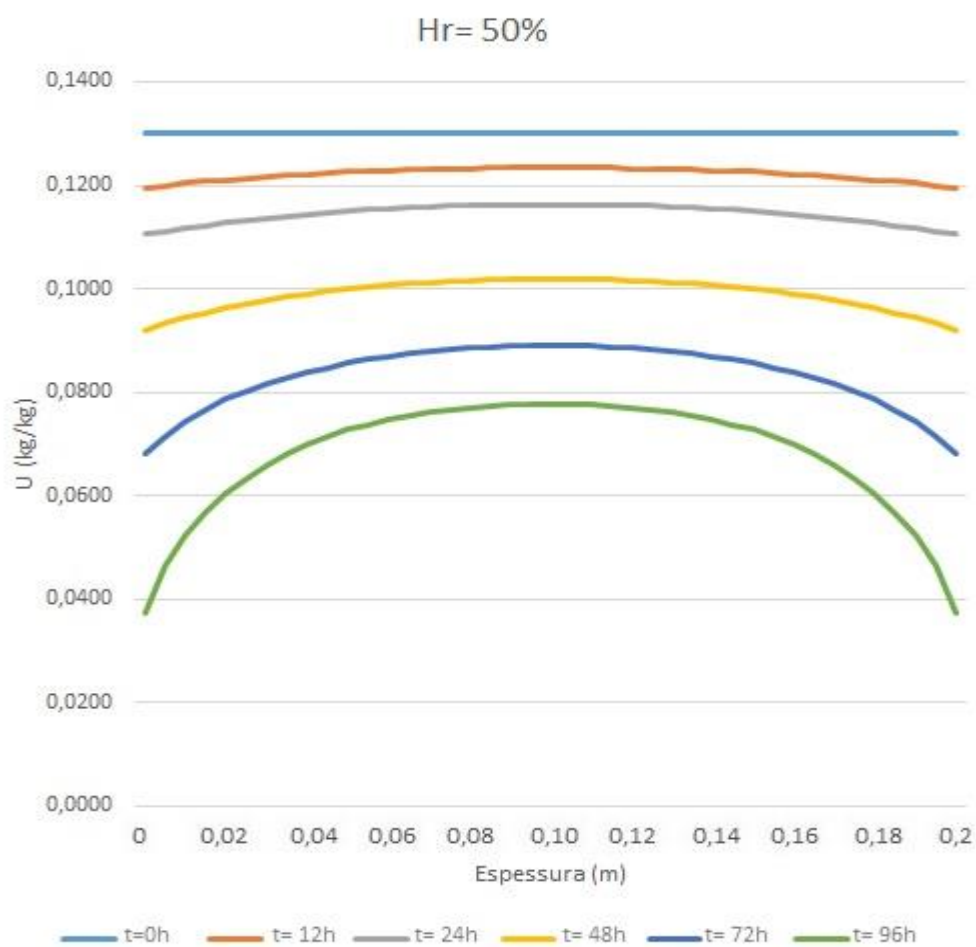
## SIMULAÇÕES PARA O BARRO VERMELHO

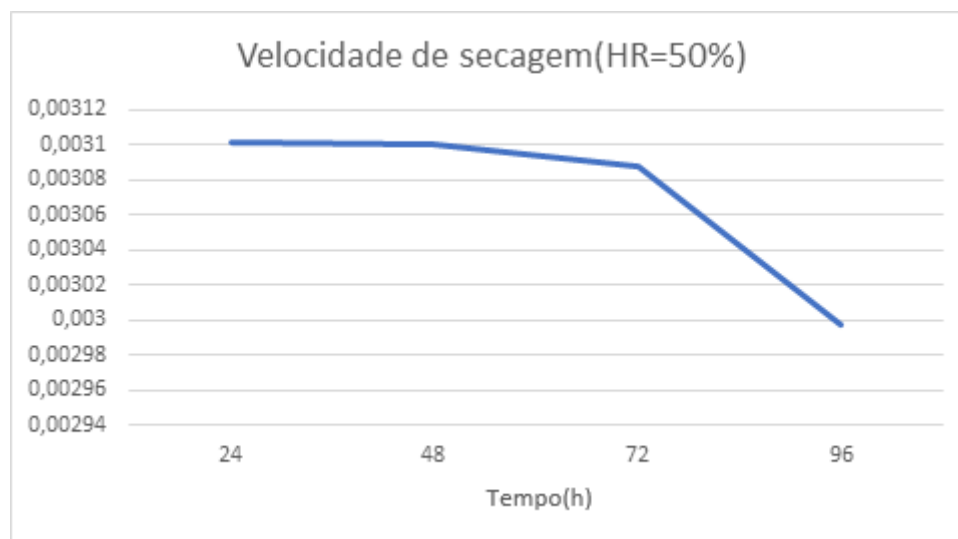
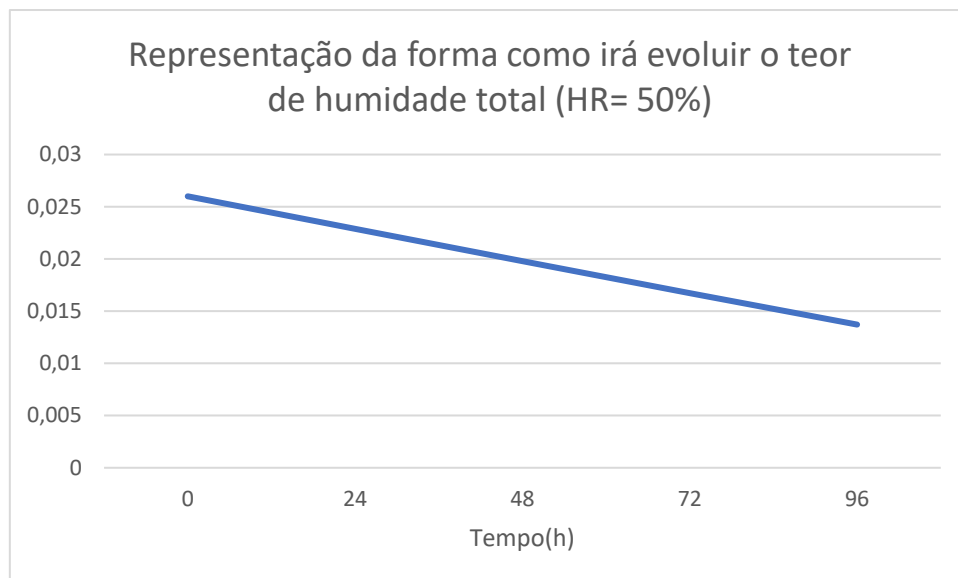
### 1BV-HR



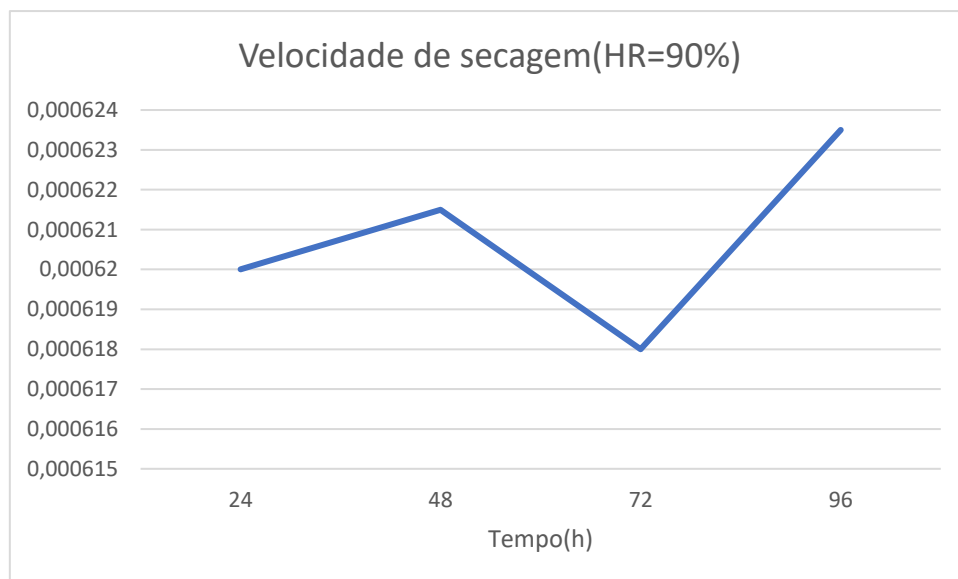
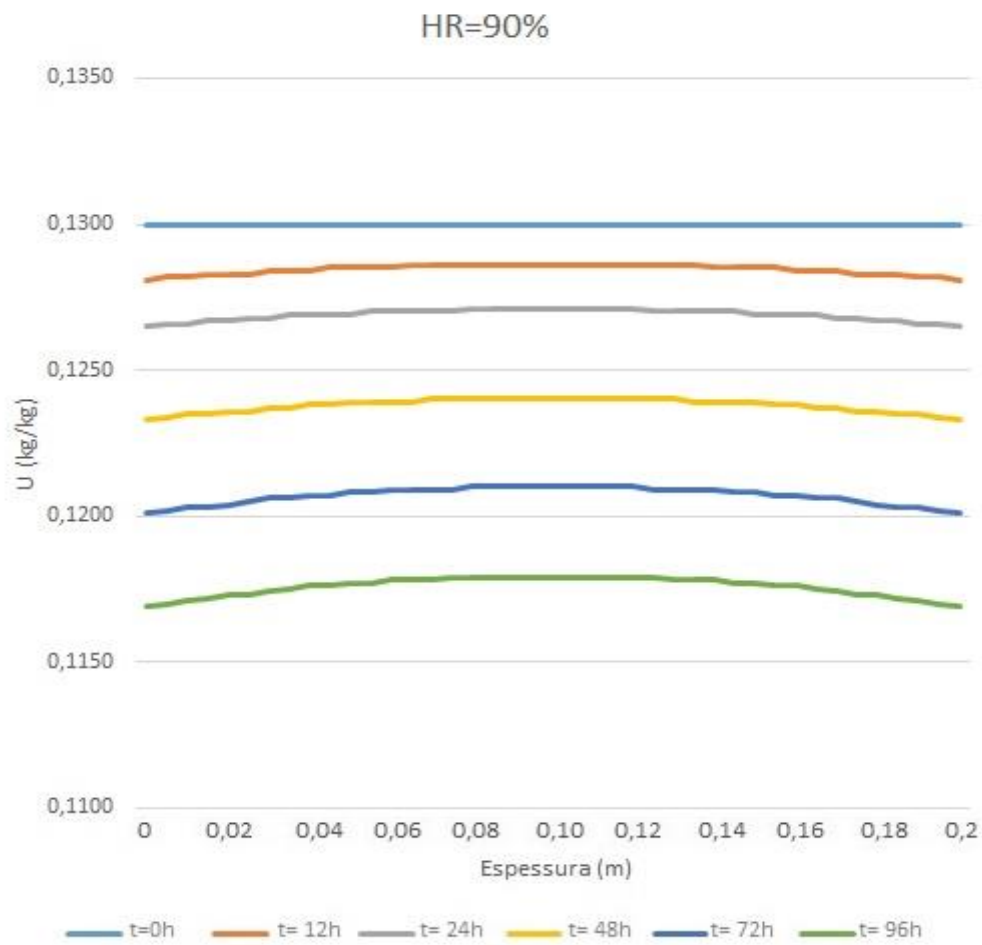


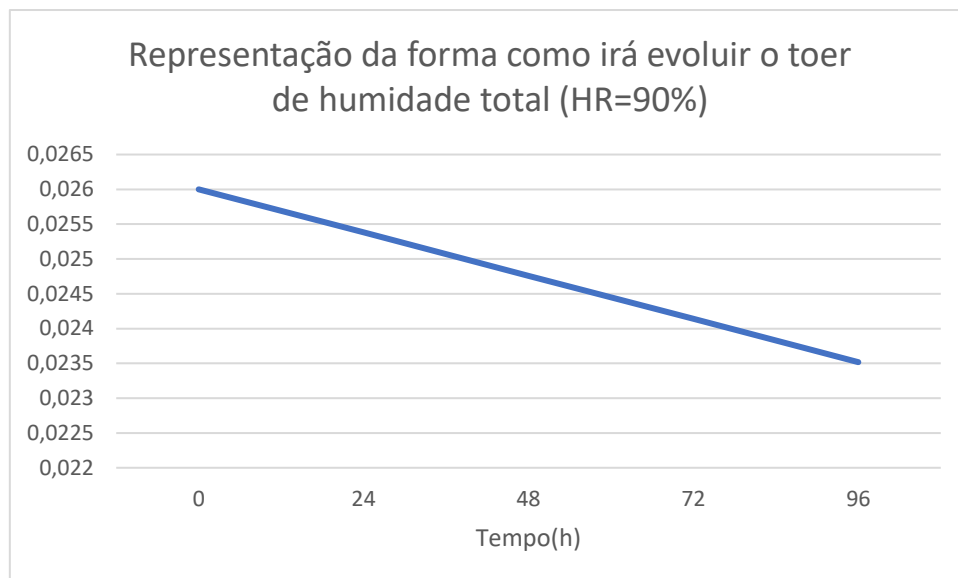
3BV-HR





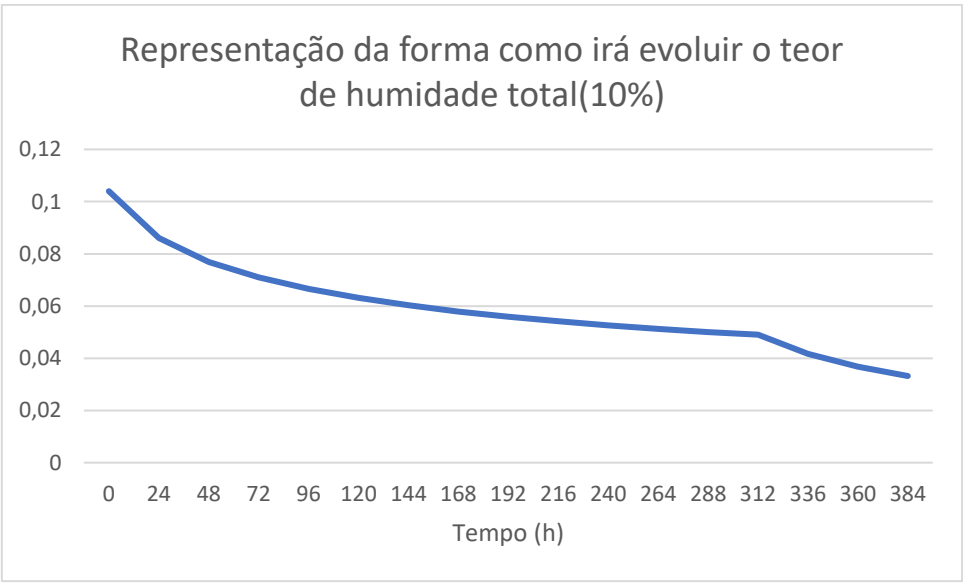
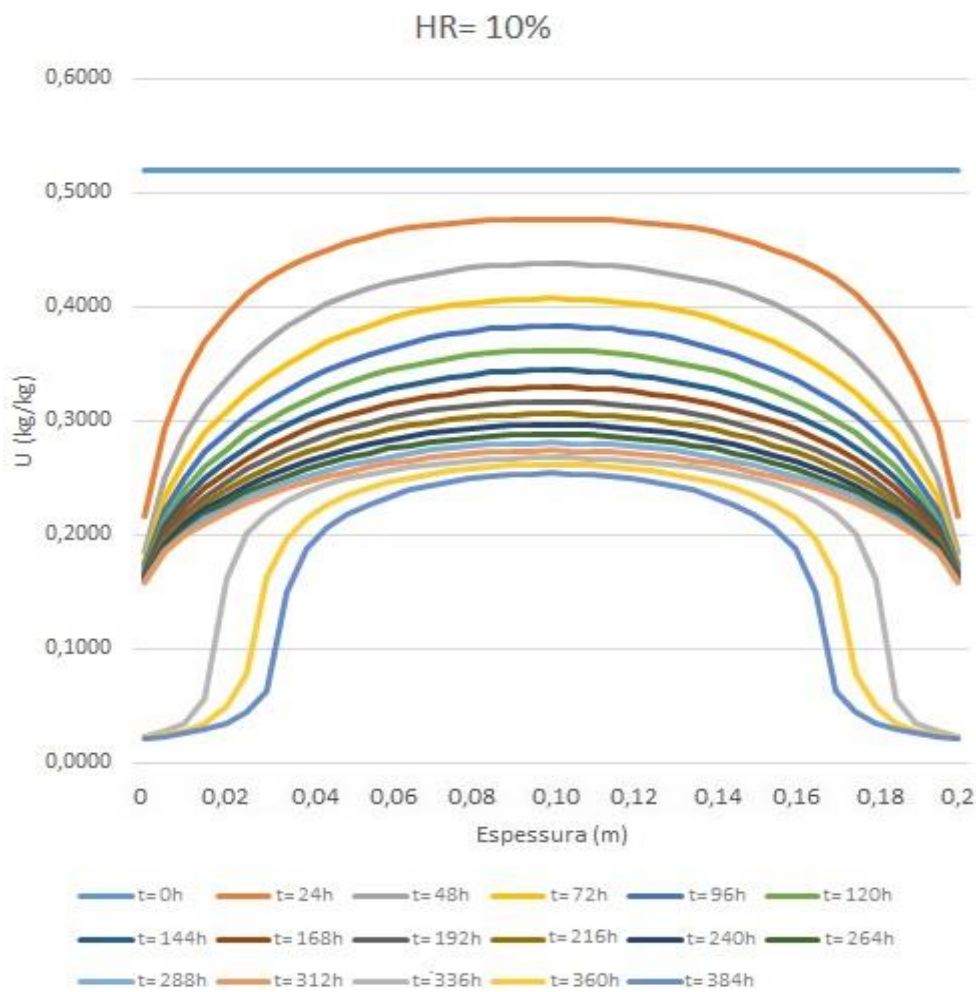
5BV-HR

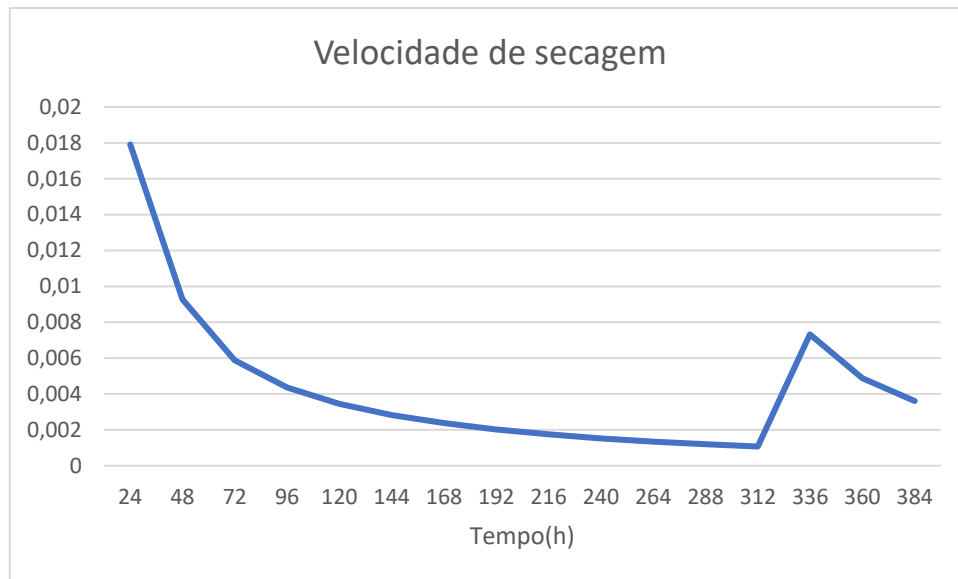




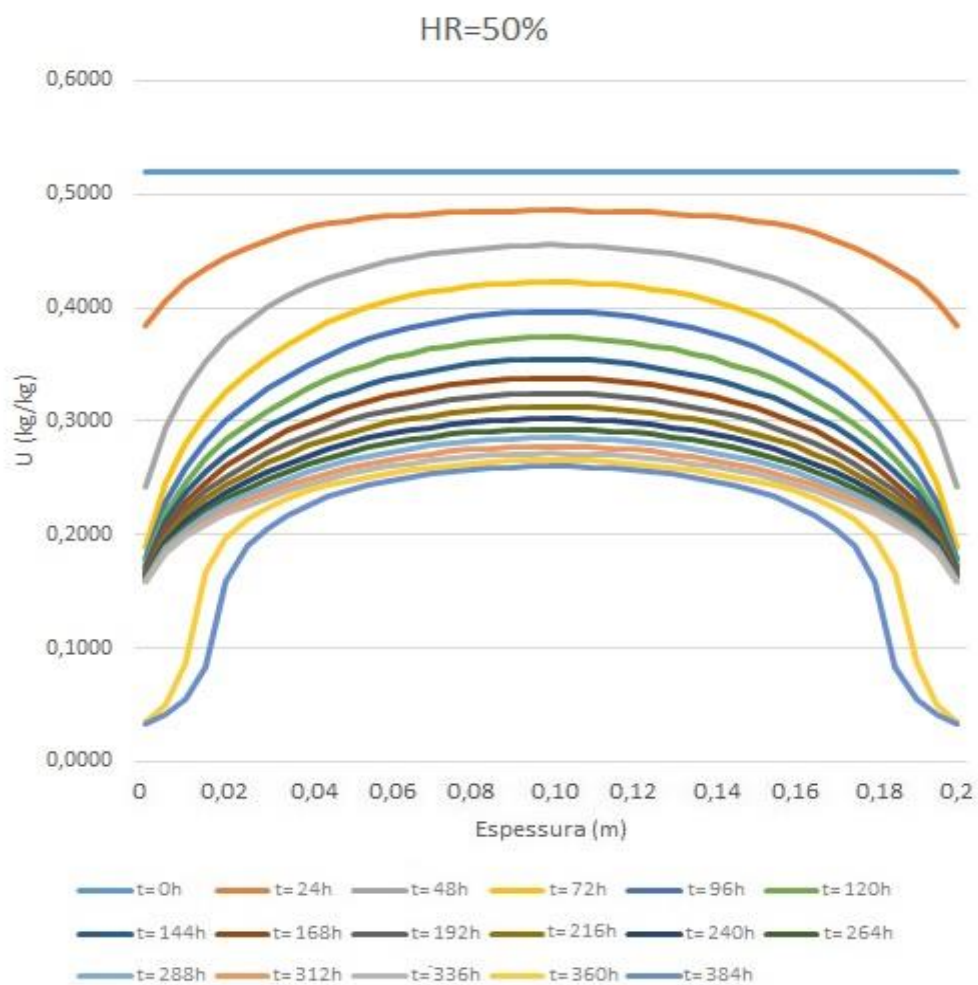
SIMULAÇÕES PARA O BETÃO CELULAR

1BC-HR

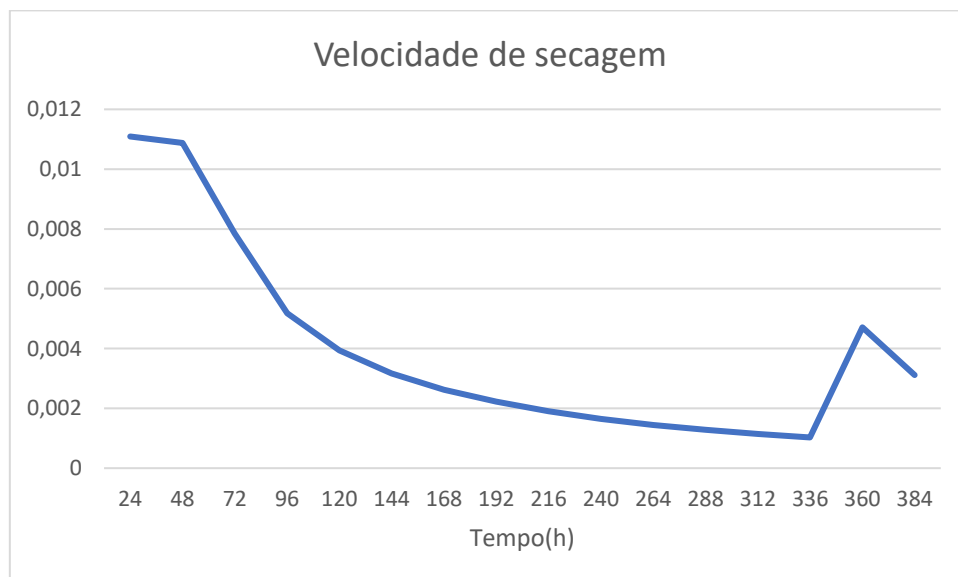
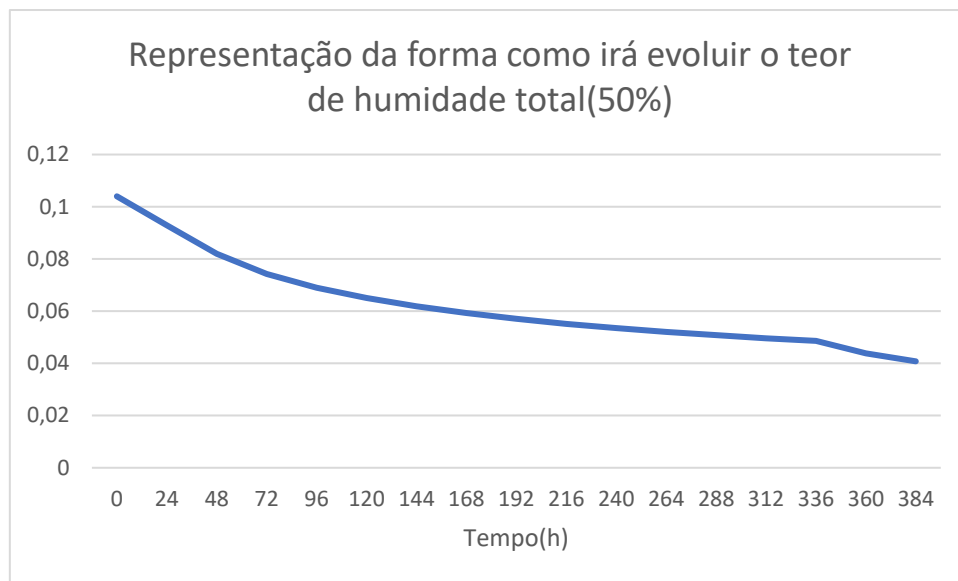




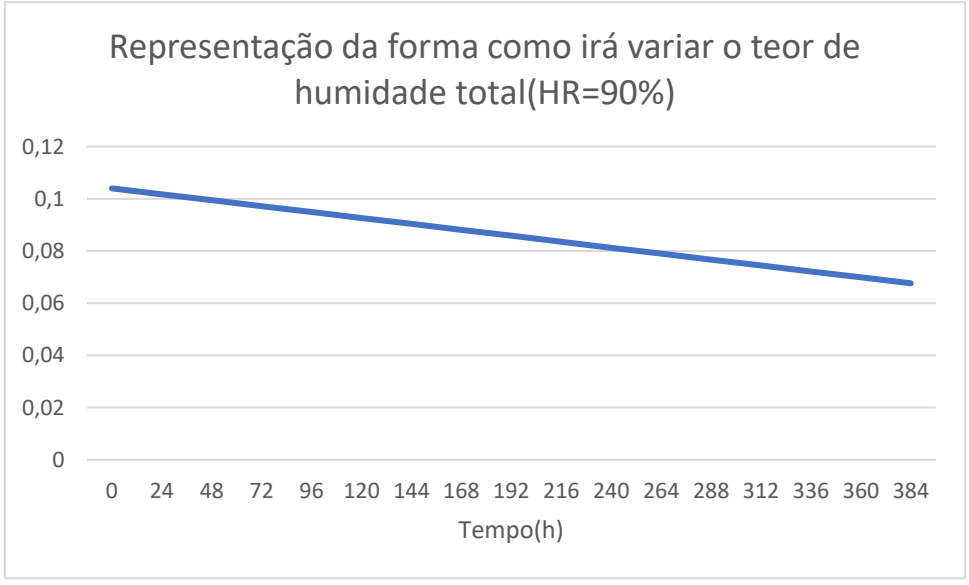
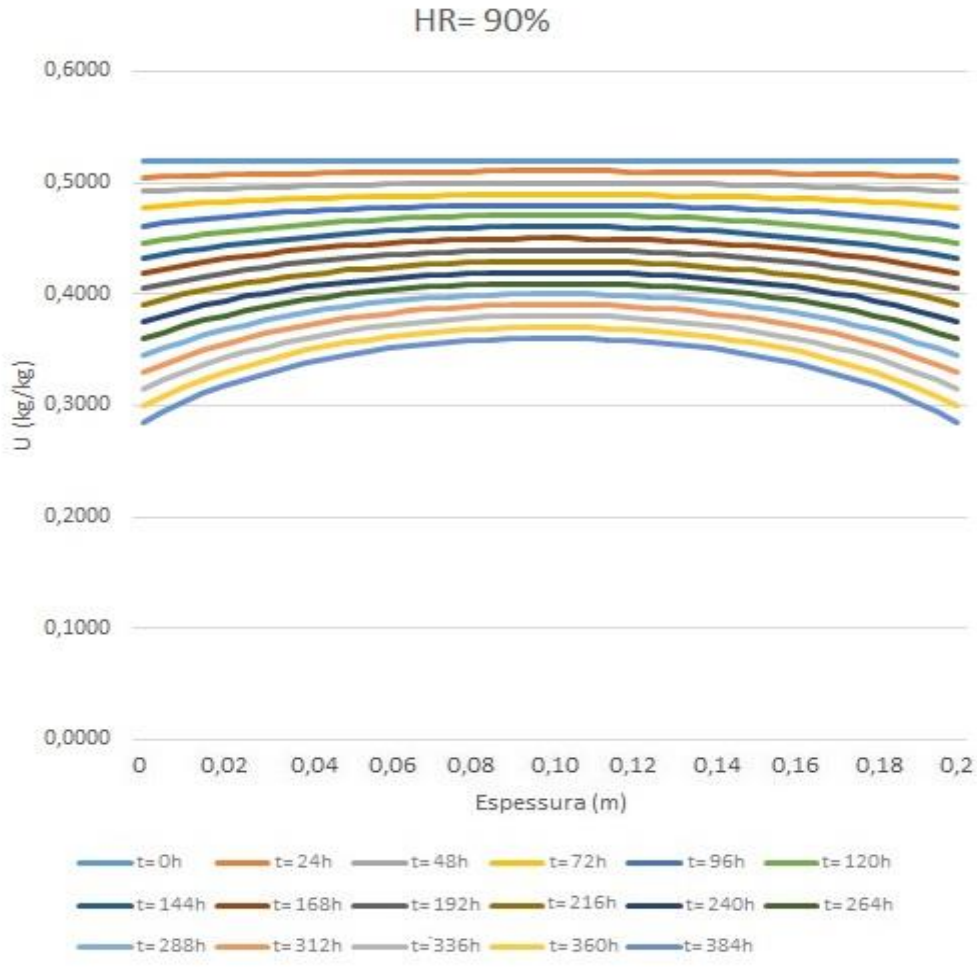
3BC-HR

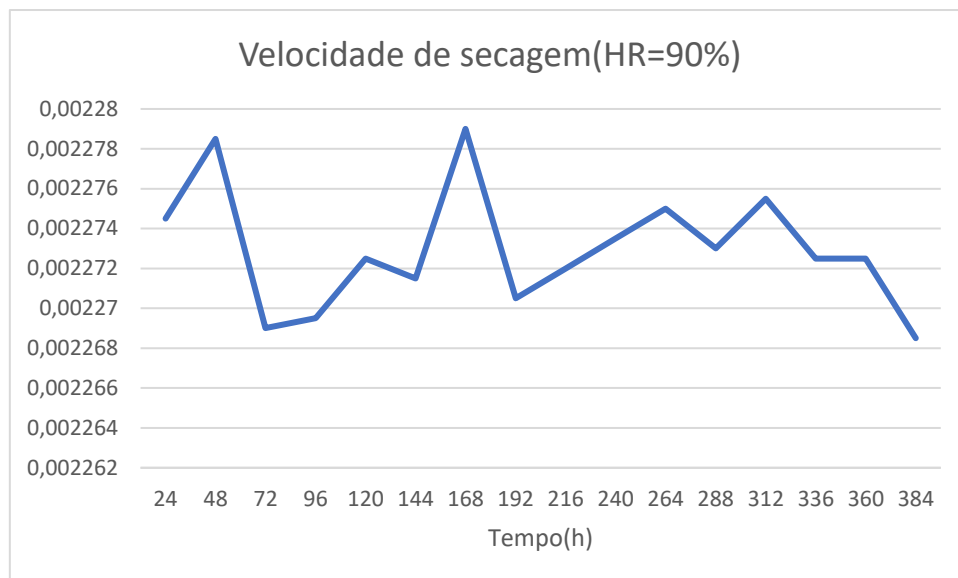






5BC-HR



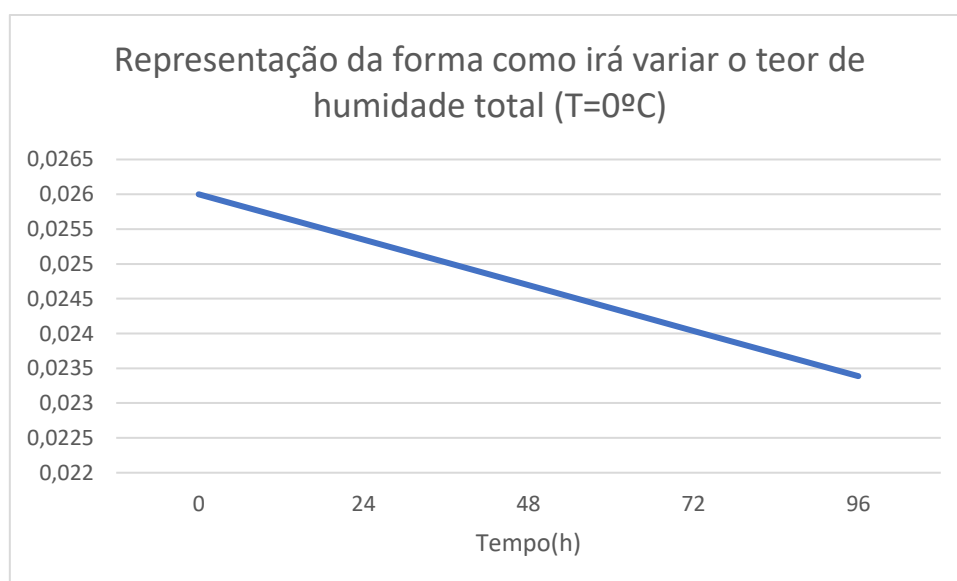
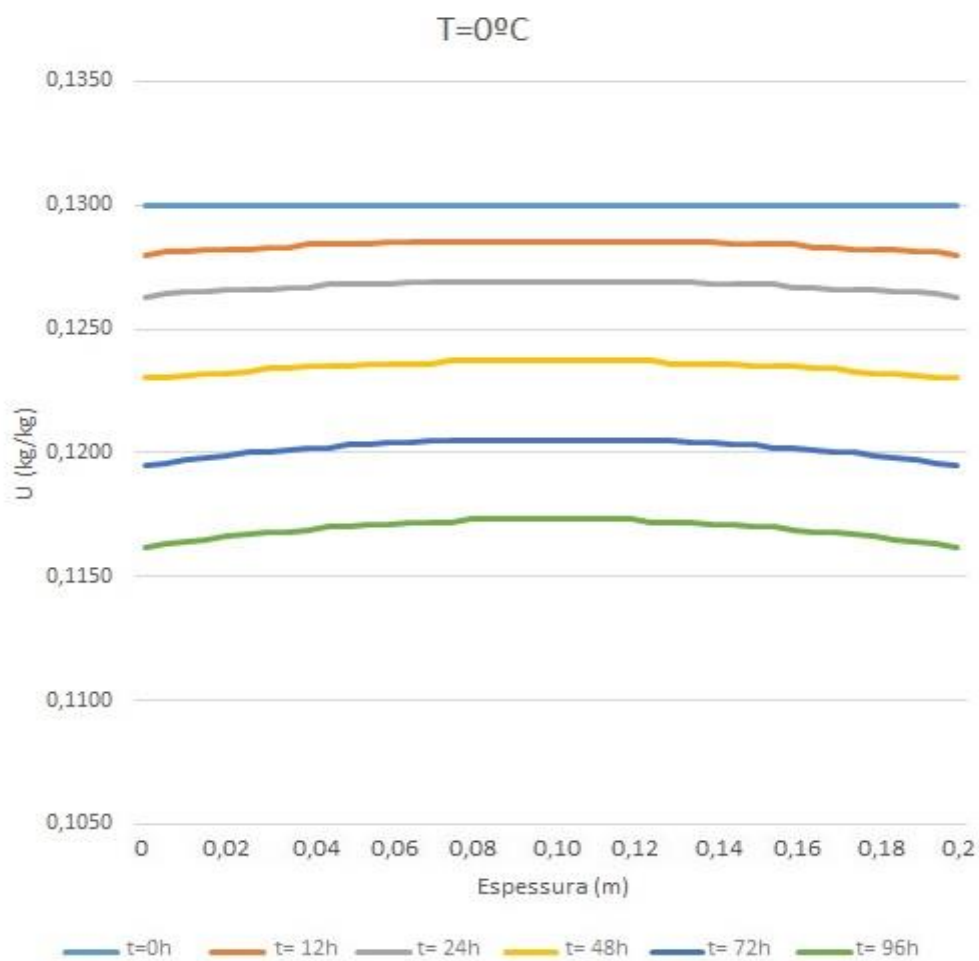


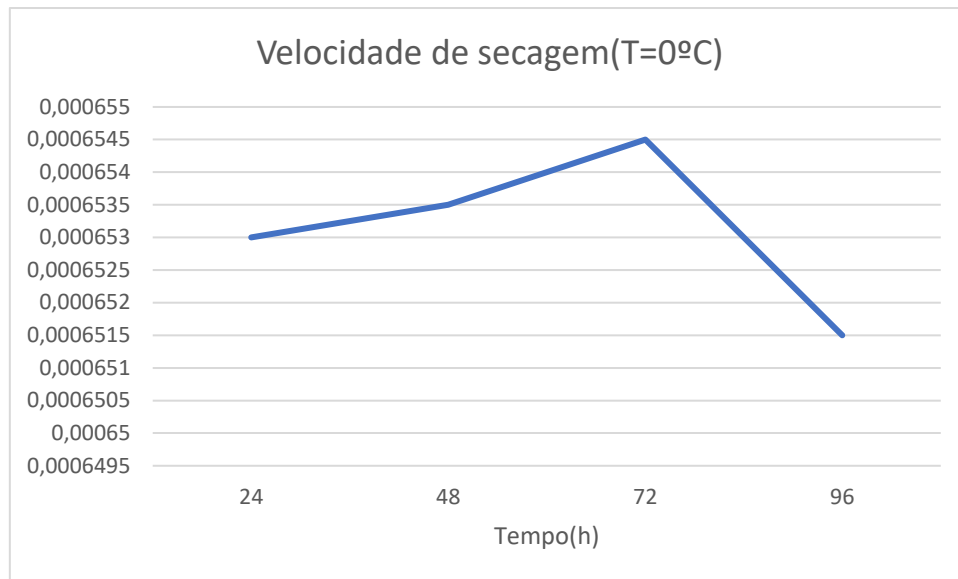
## **Anexo 2**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE  
NA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM

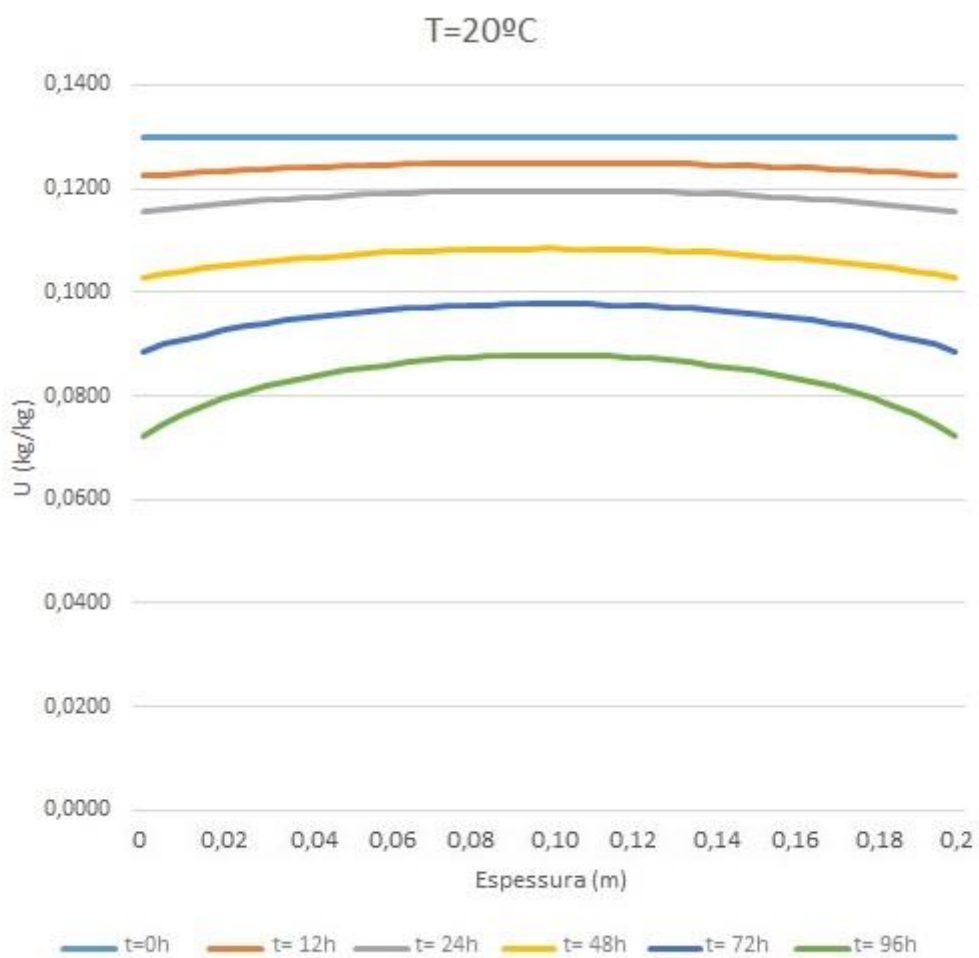
## SIMULAÇÕES PARA O BARRO VERMELHO

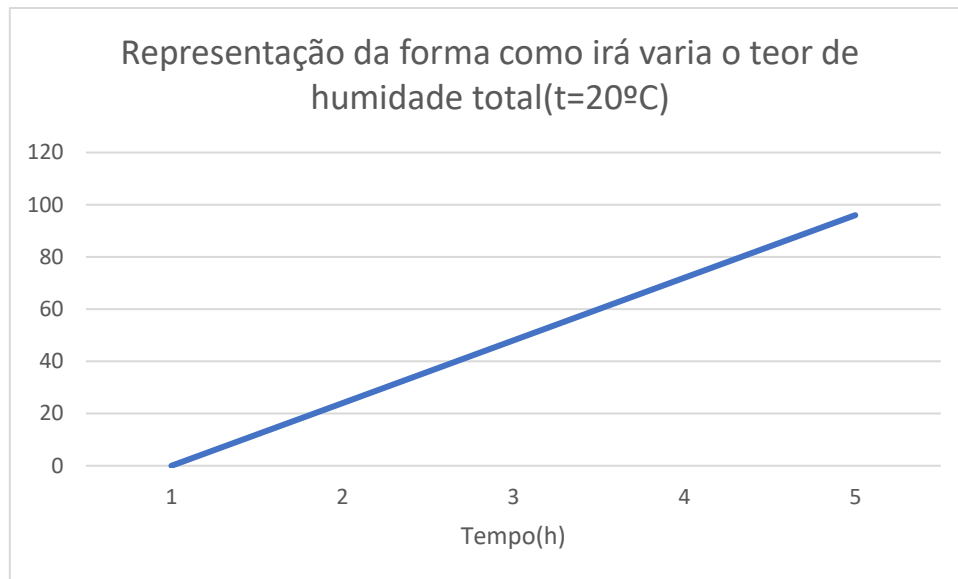
### 1BV-T



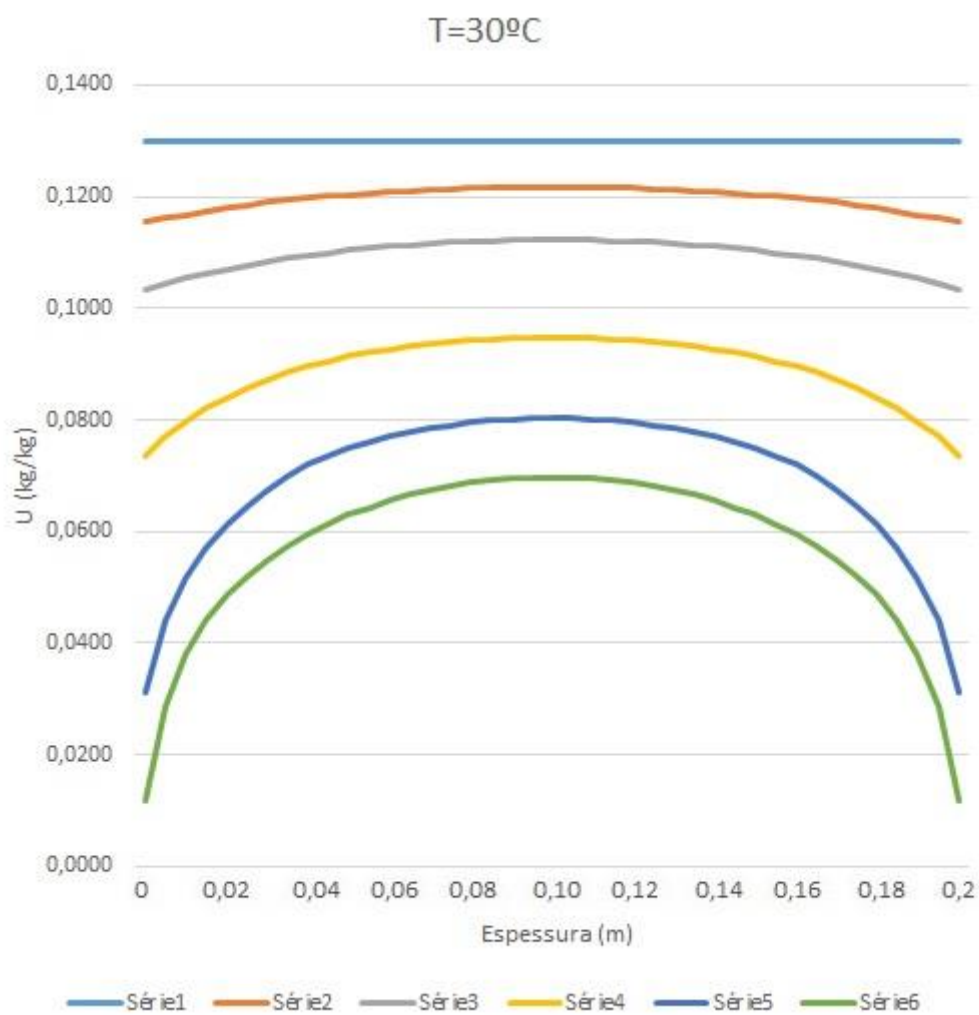


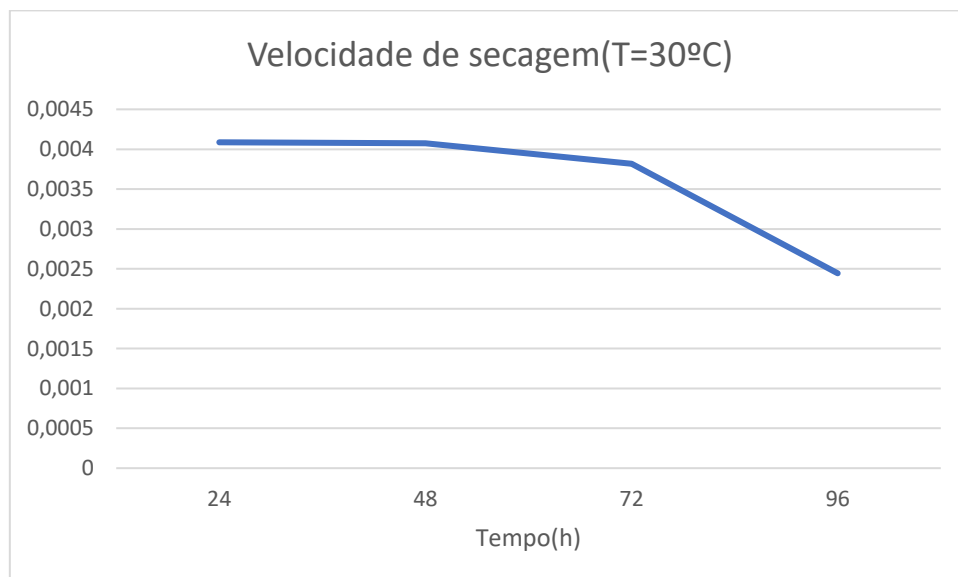
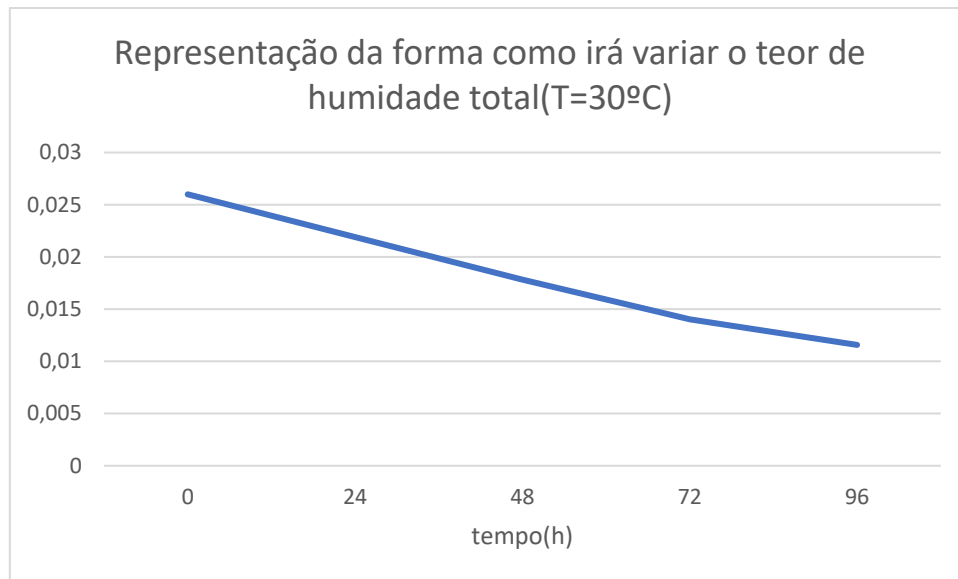
3BV-T





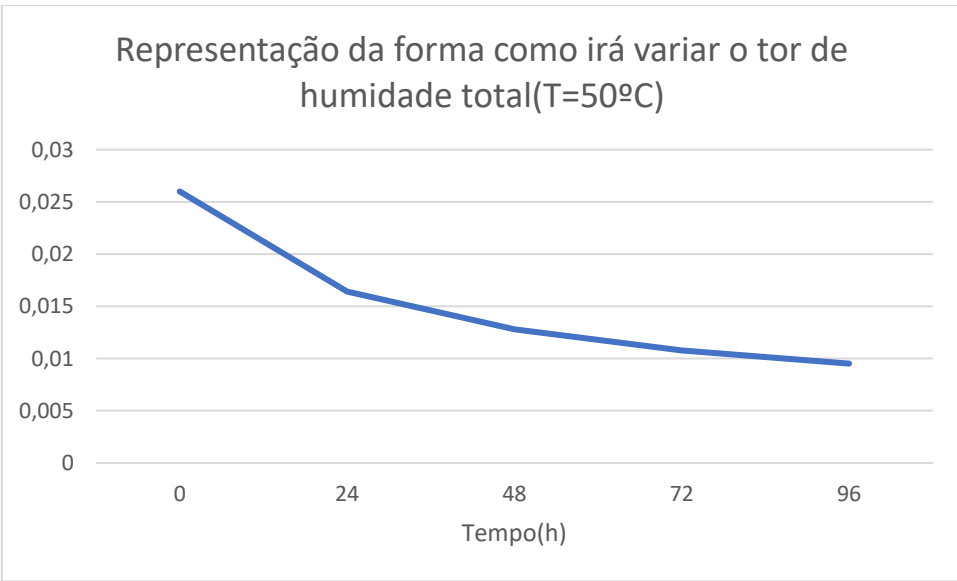
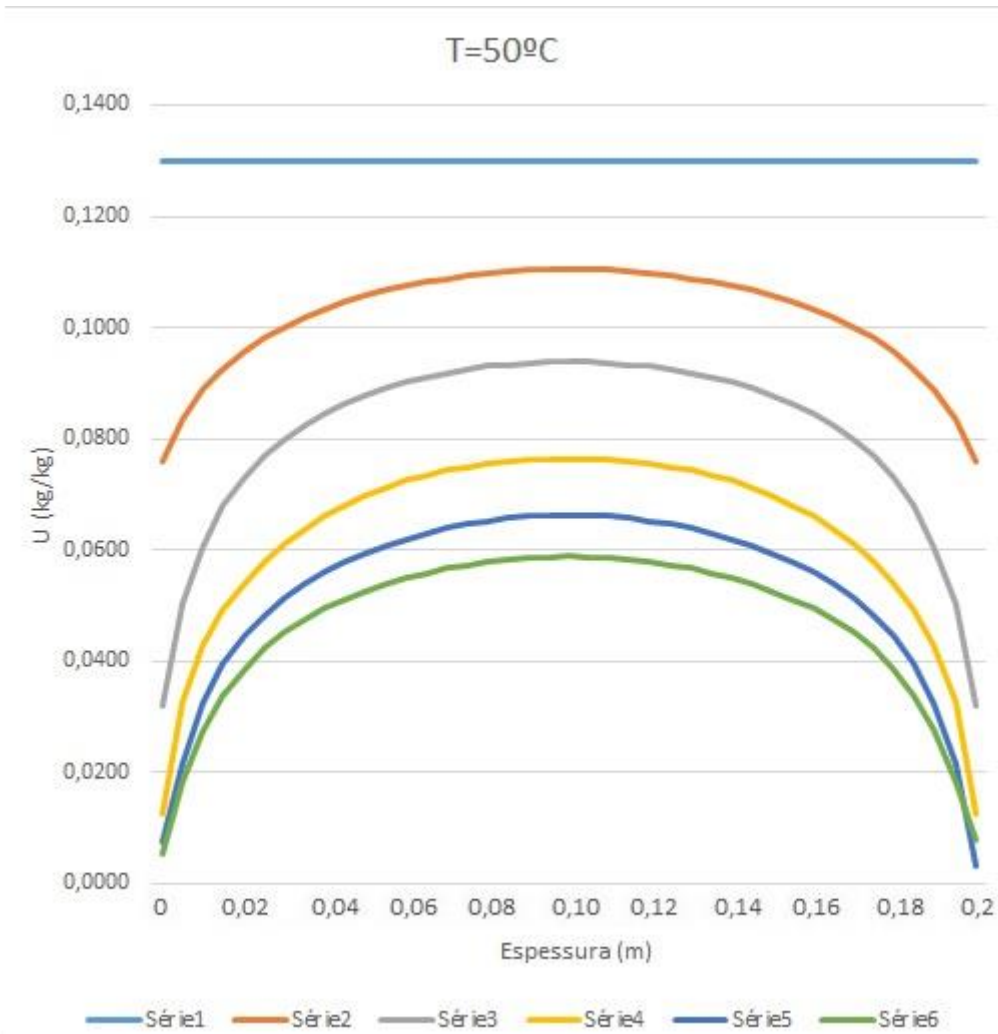
5BV-T

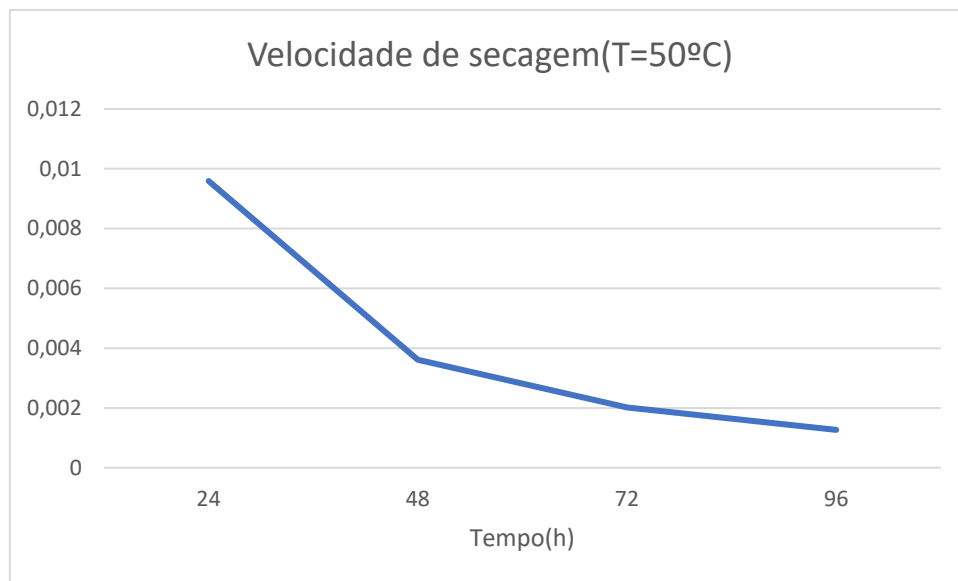






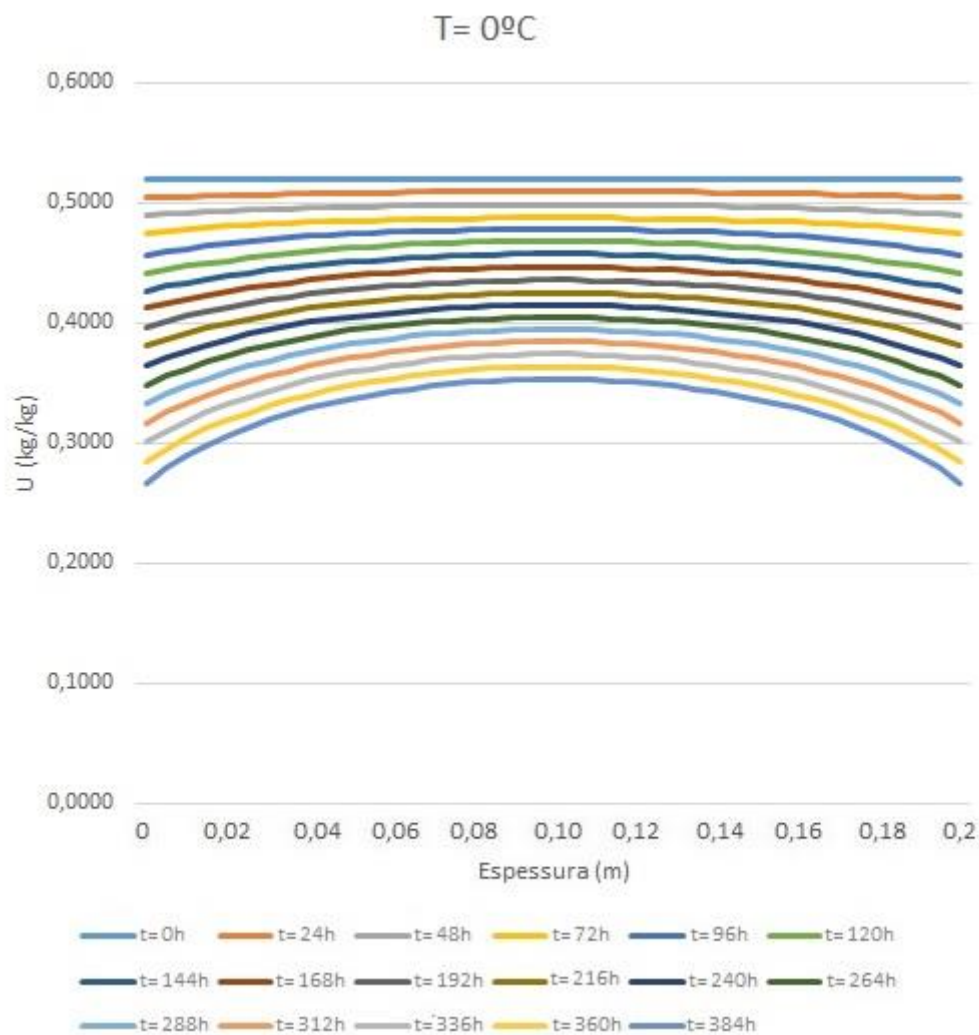
7BV-T

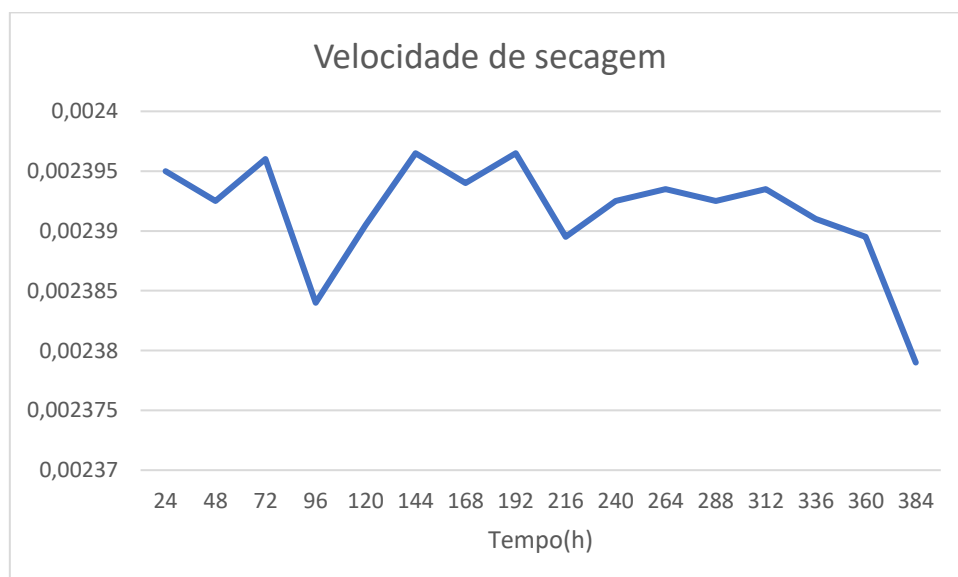
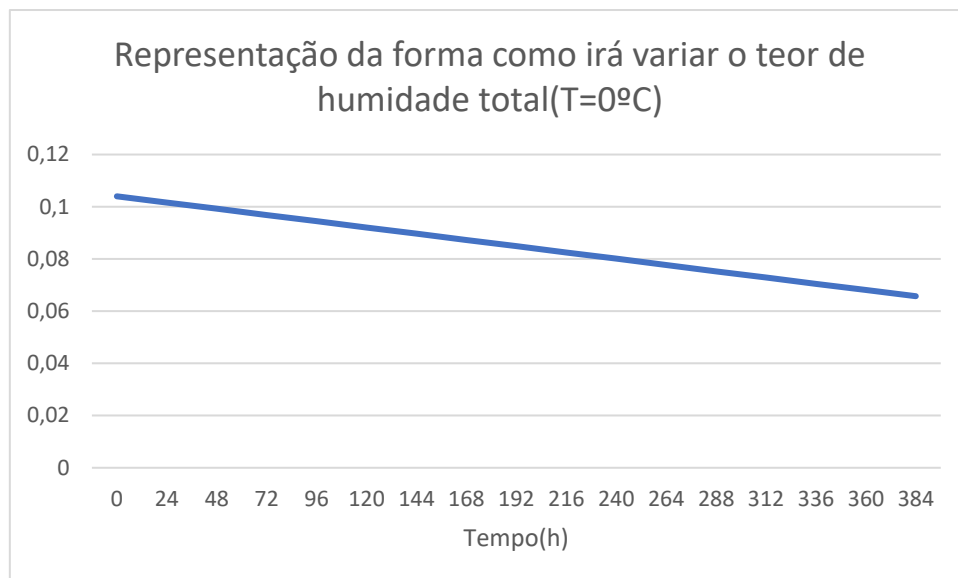




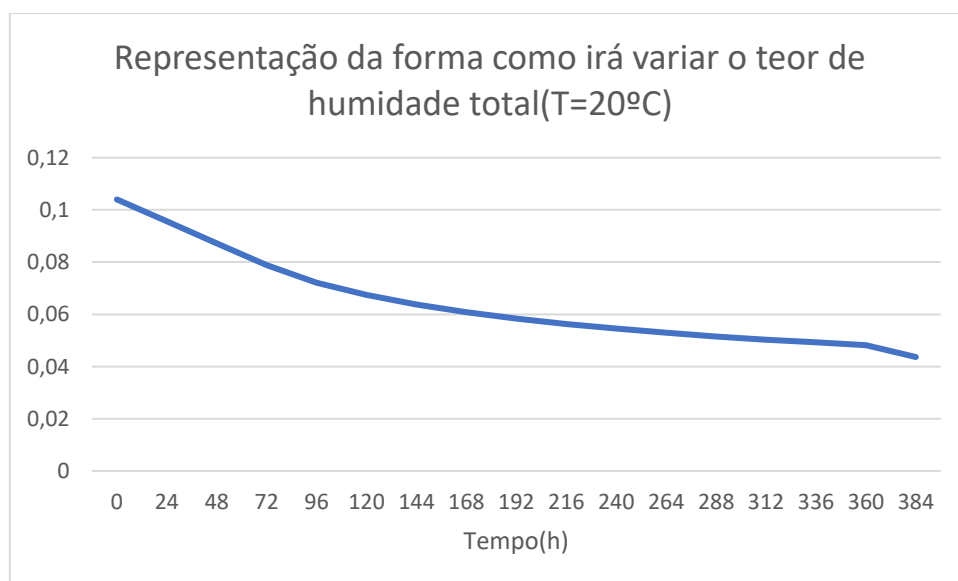
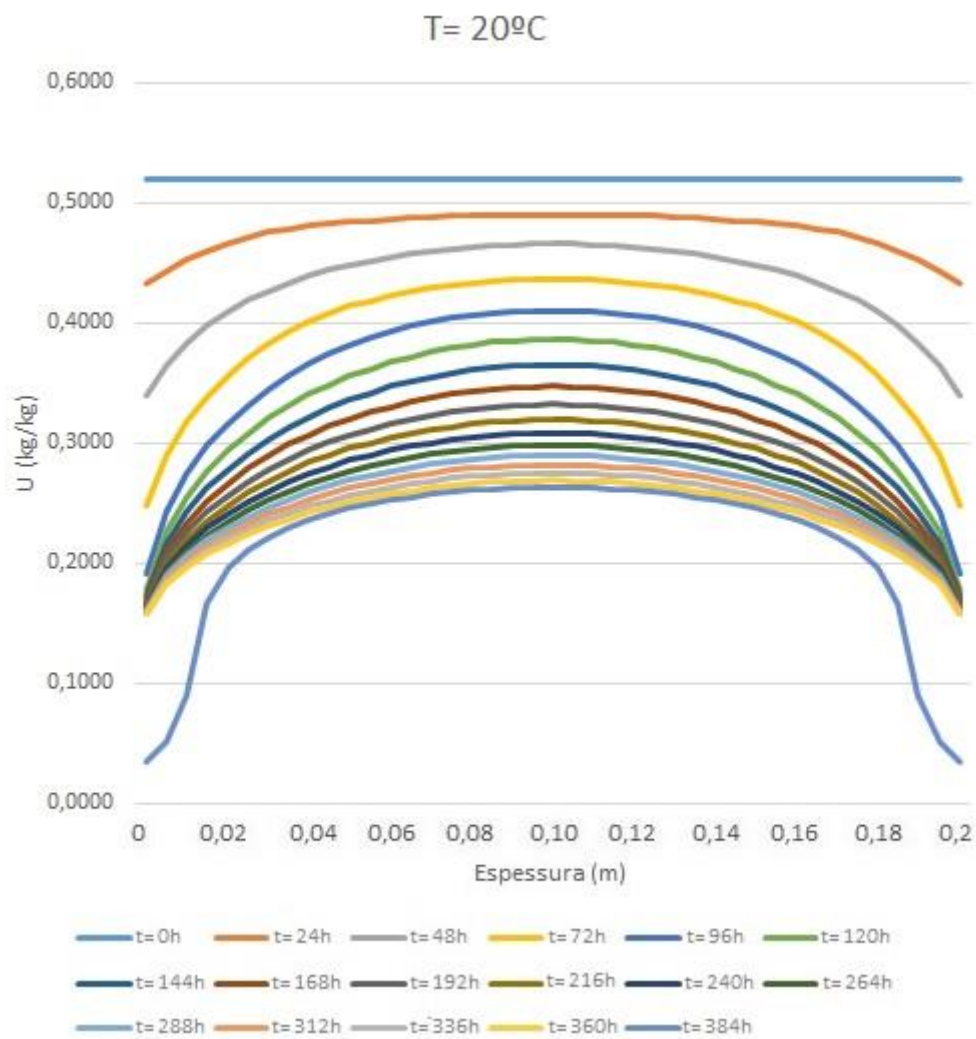
SIMULAÇÕES PARA O BETÃO

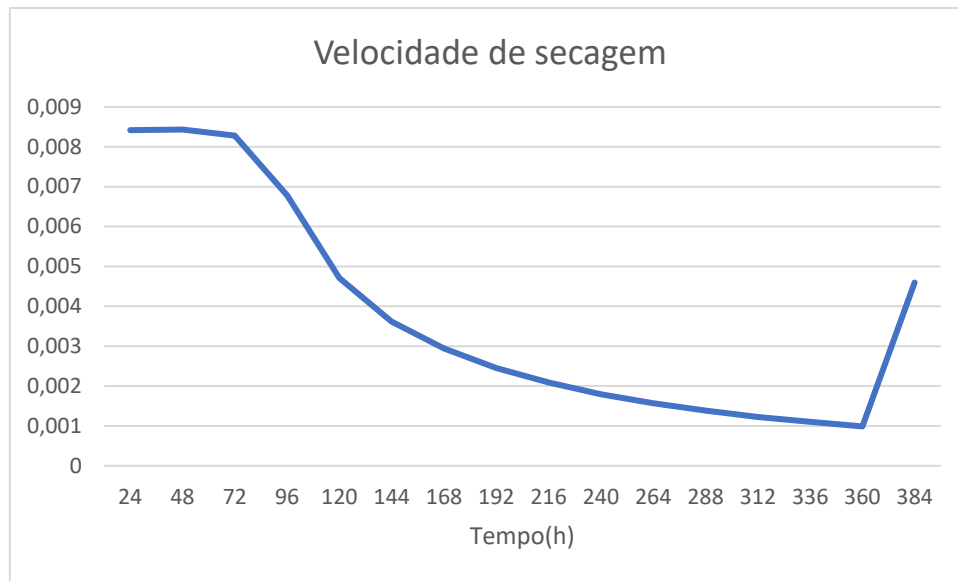
1BC-T



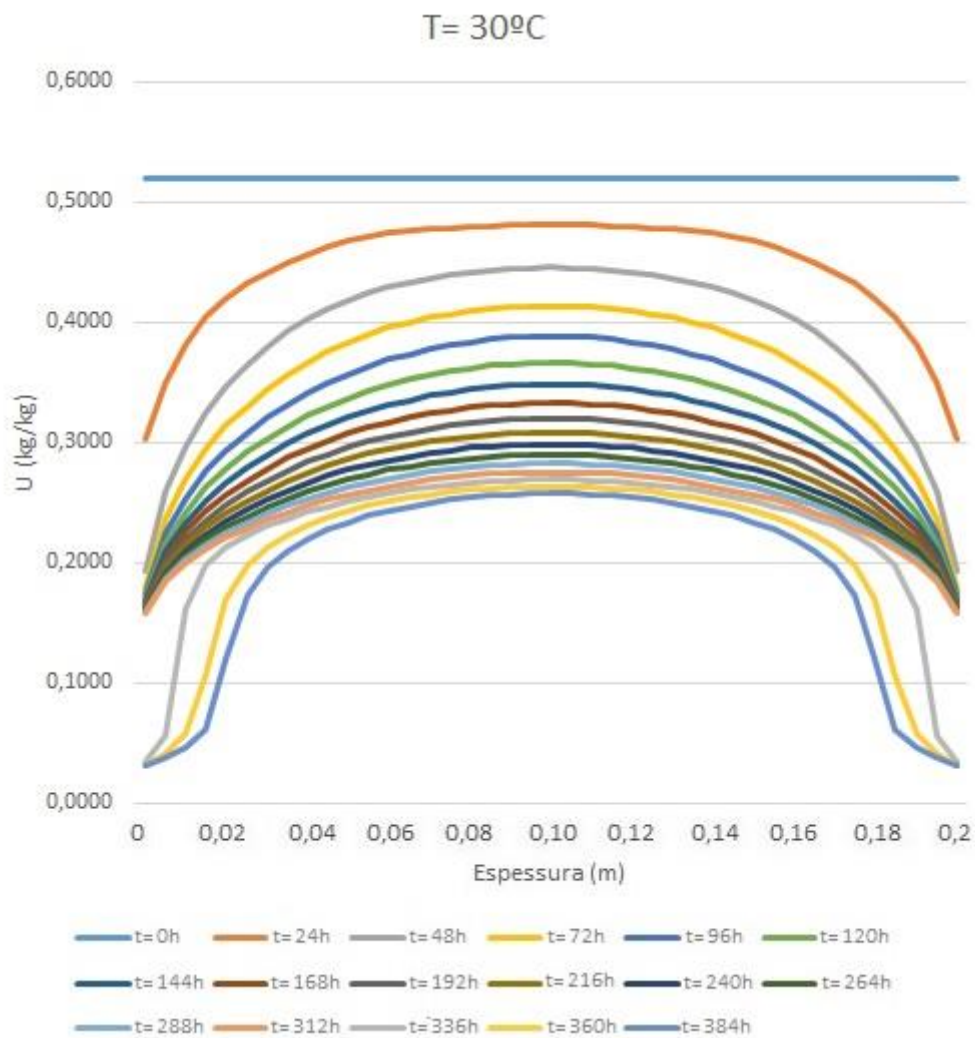


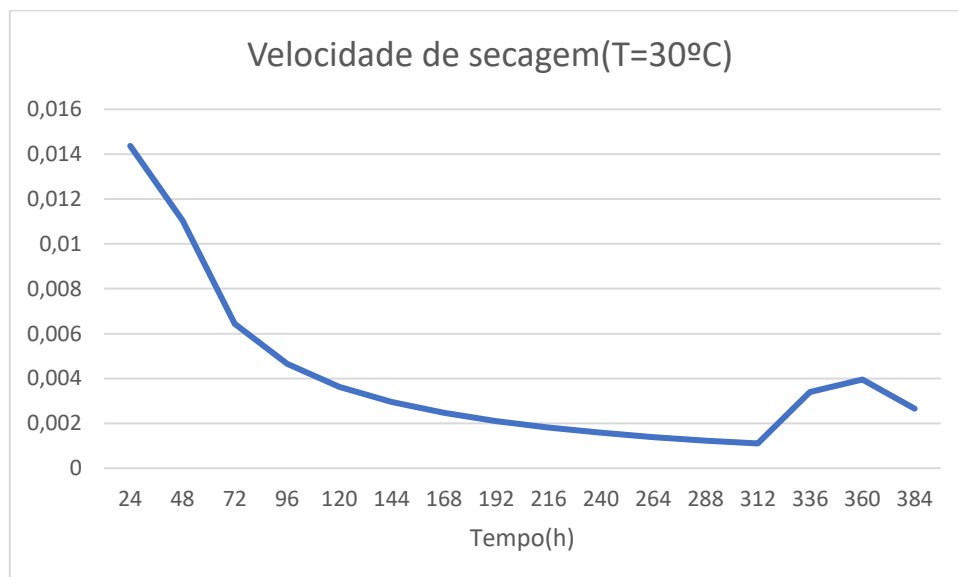
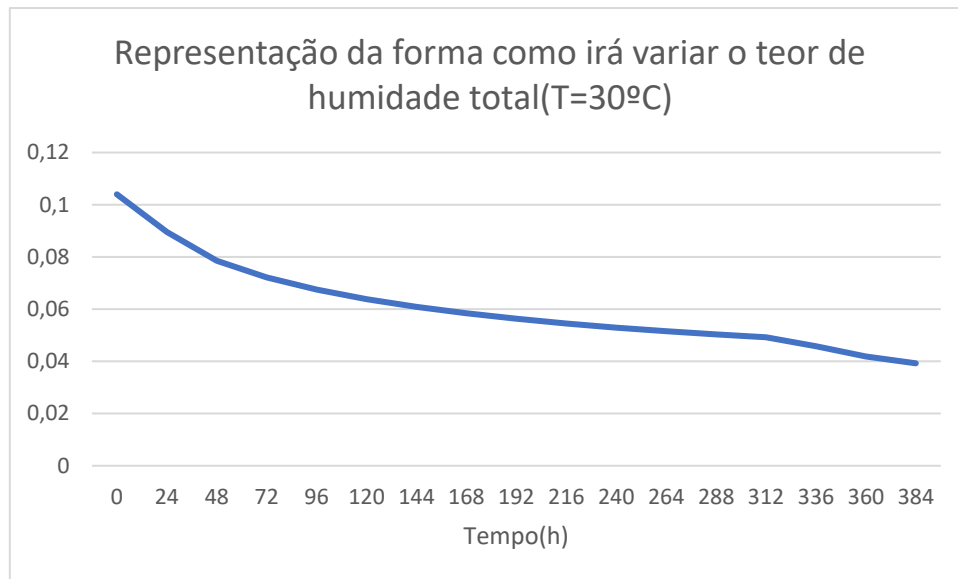
3BC-T



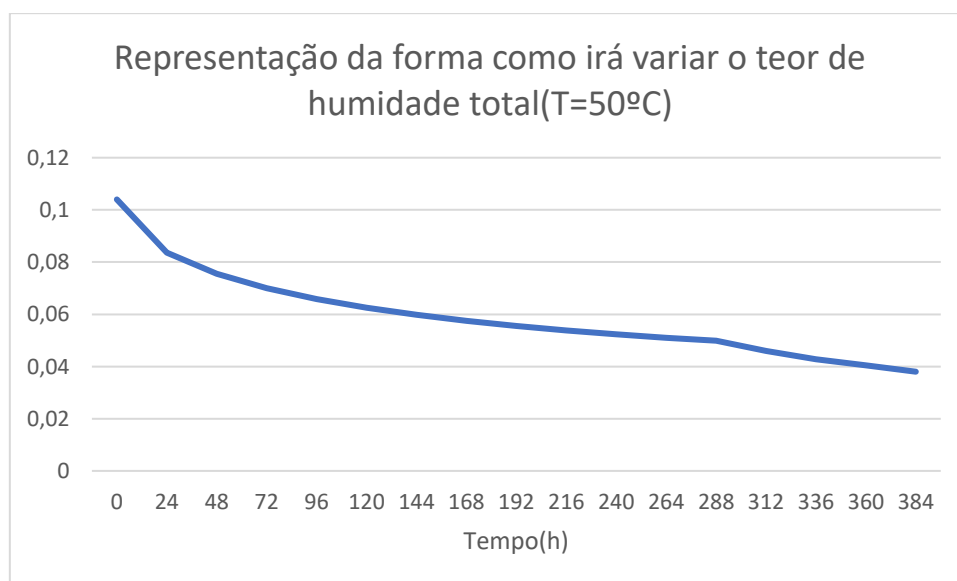
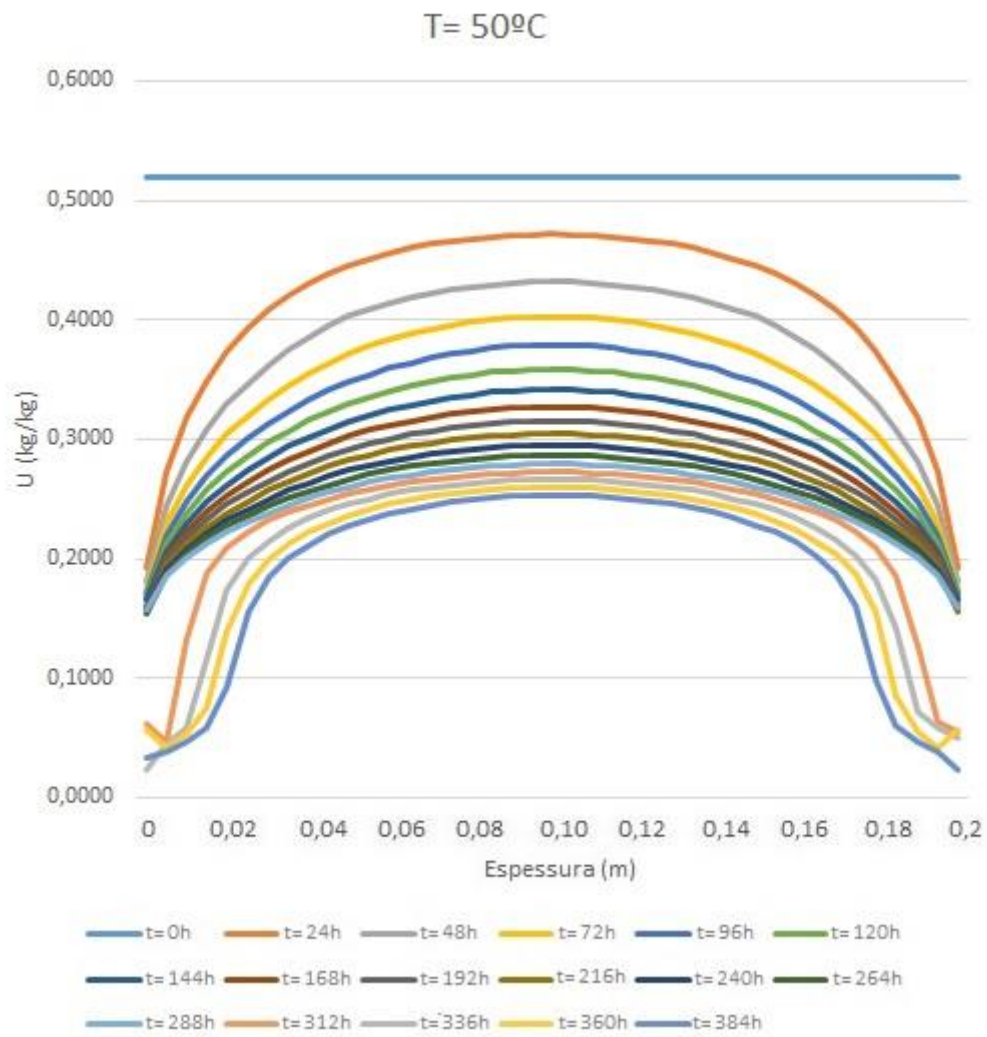


5BC-T

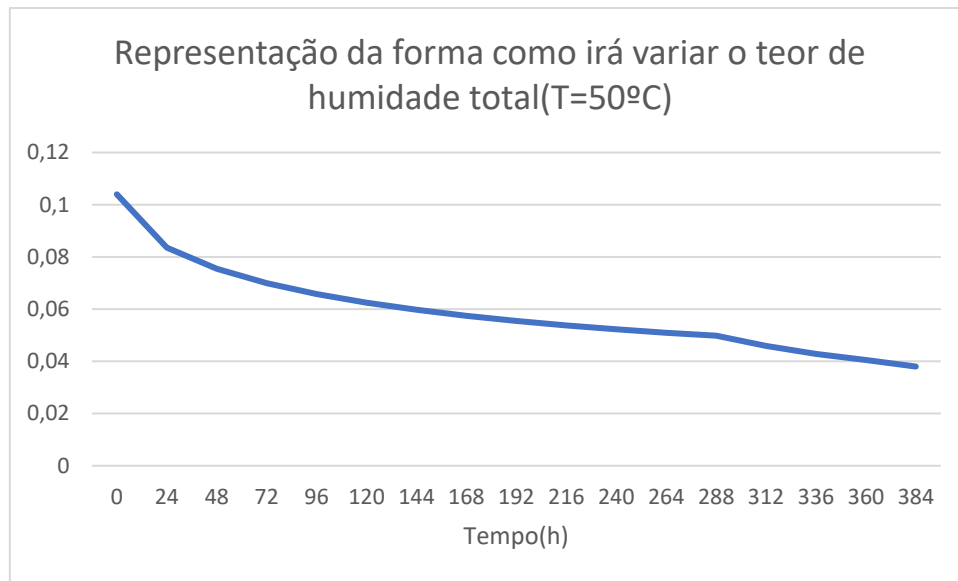




7BC-T





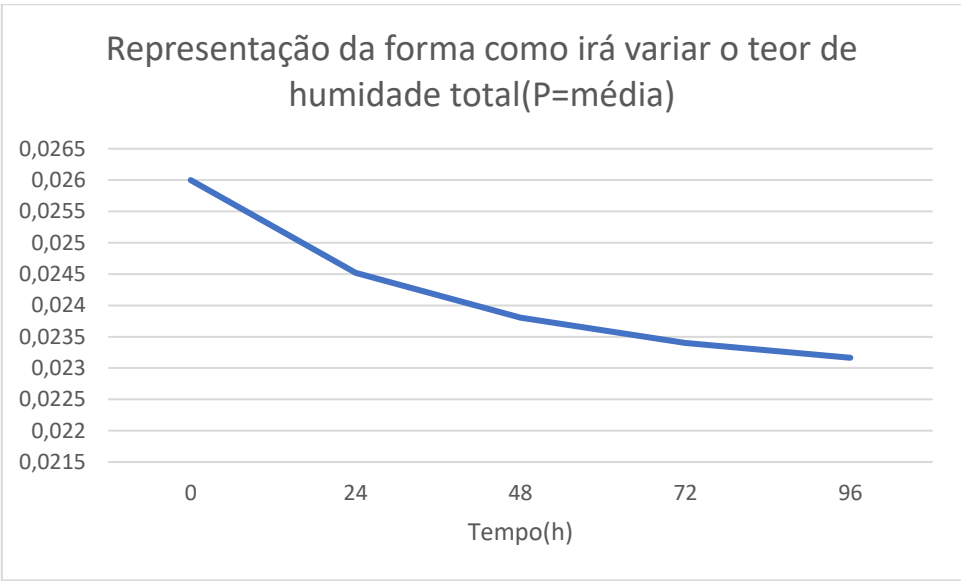
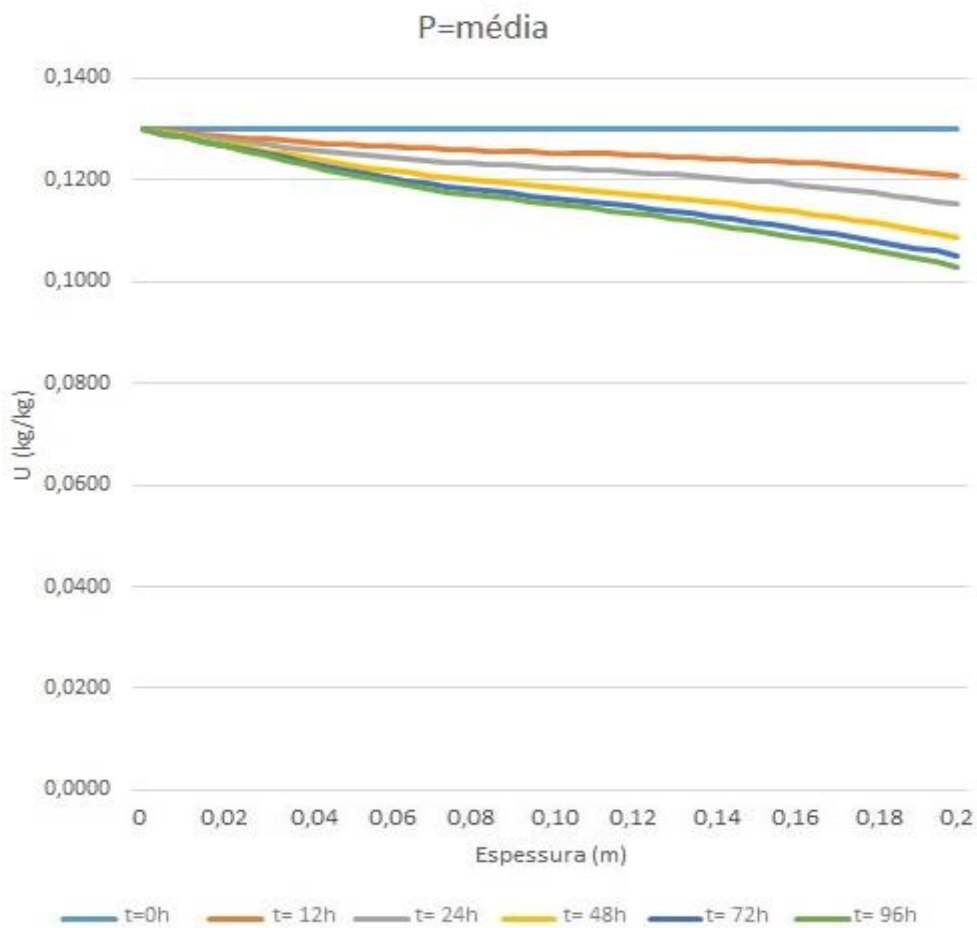


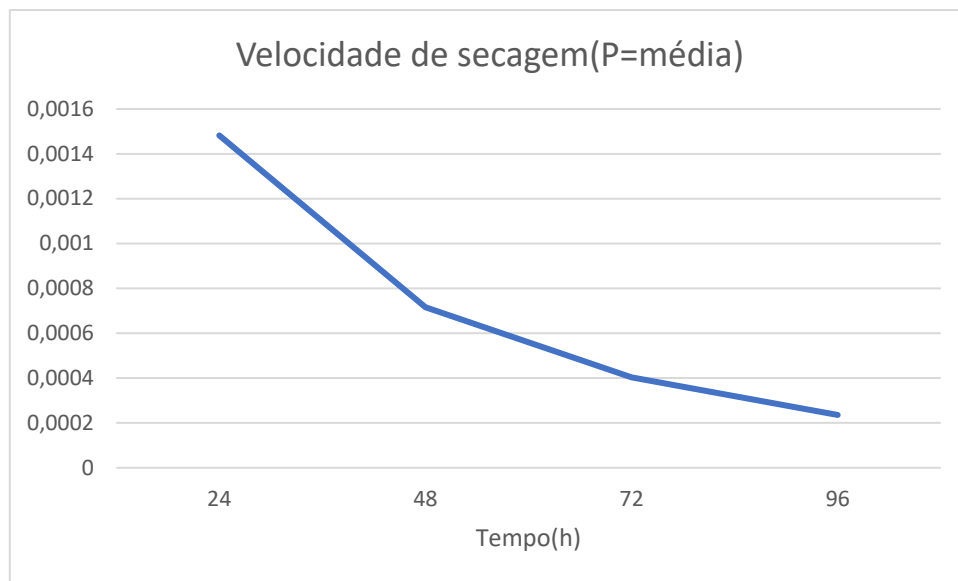
## **Anexo 3**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA PRECIPITAÇÃO NA  
SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE SECAGEM

SIMULAÇÕES PARA O BARRO VERMELHO

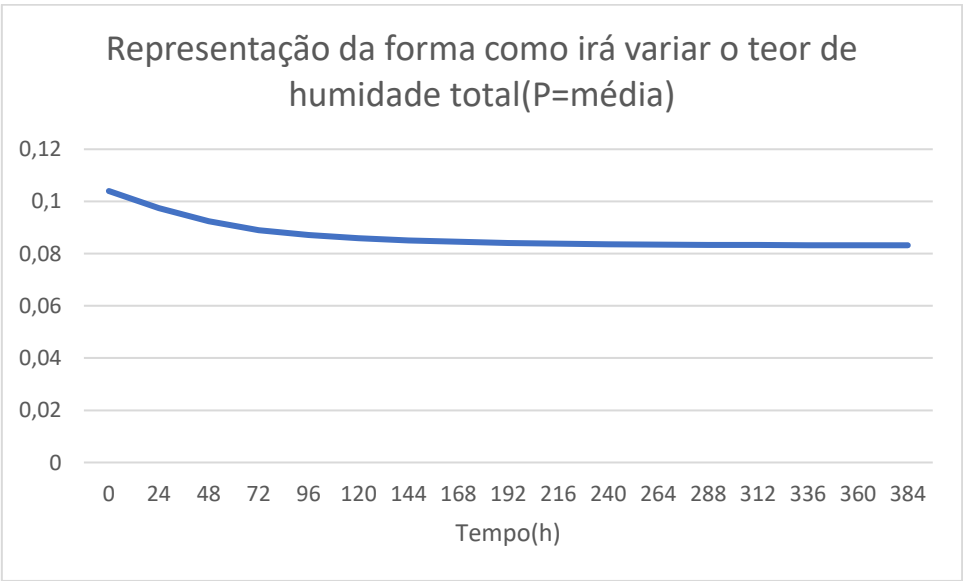
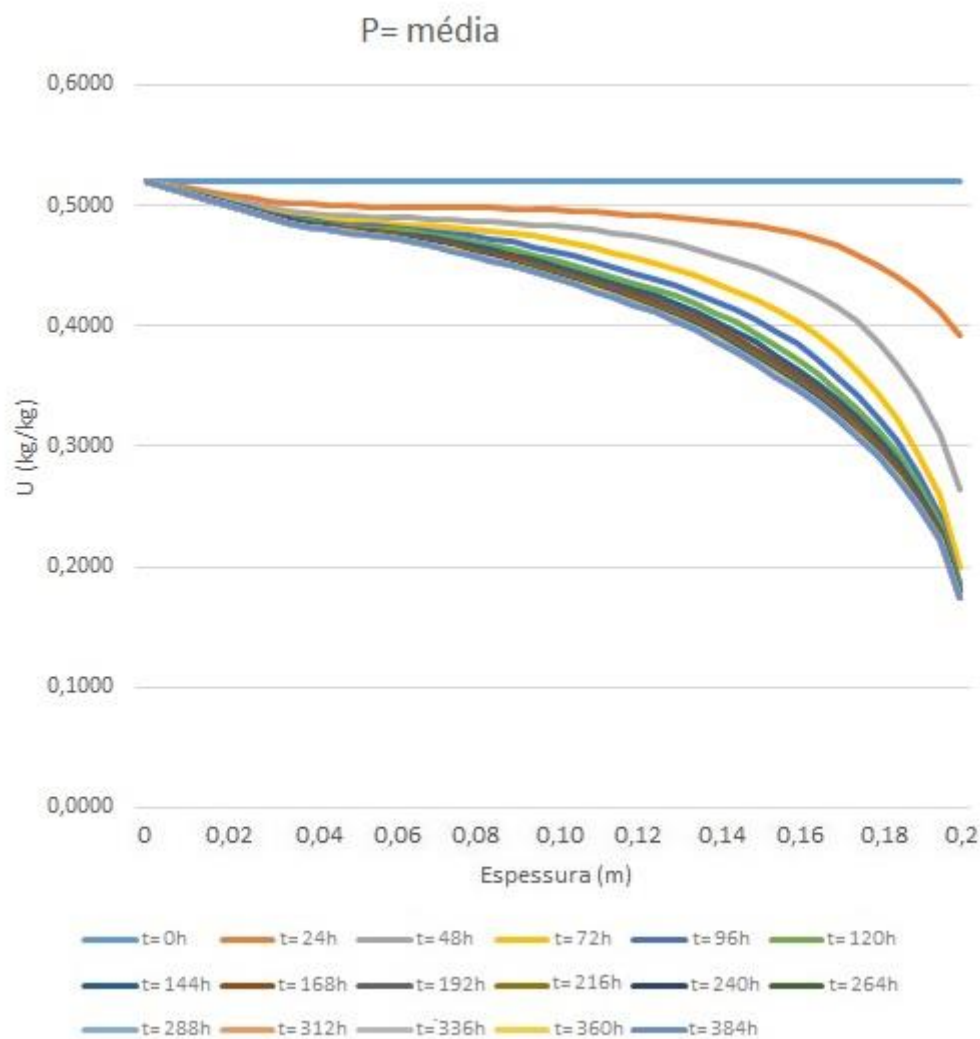
2BV-P

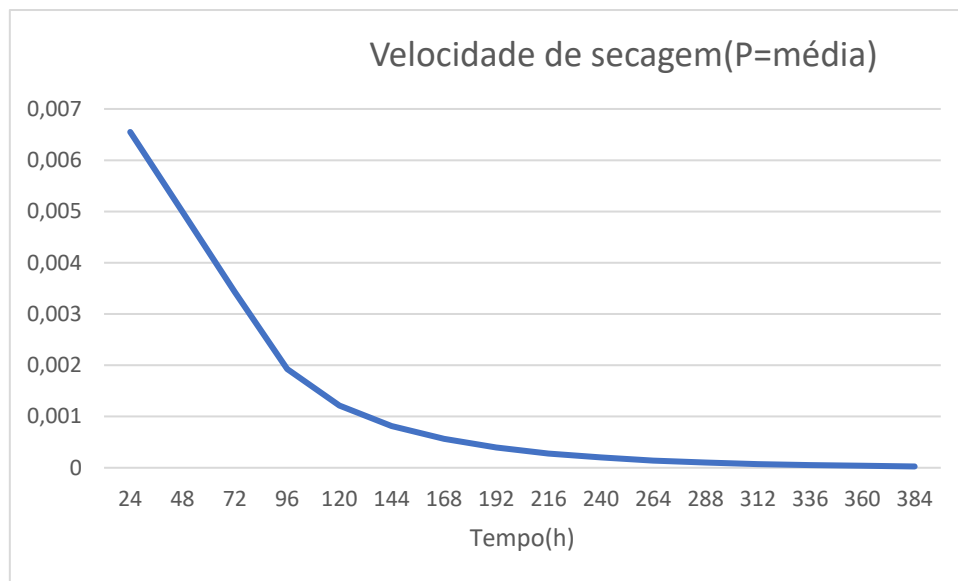




SIMULAÇÕES PARA O BETÃO CELULAR

2BC-P



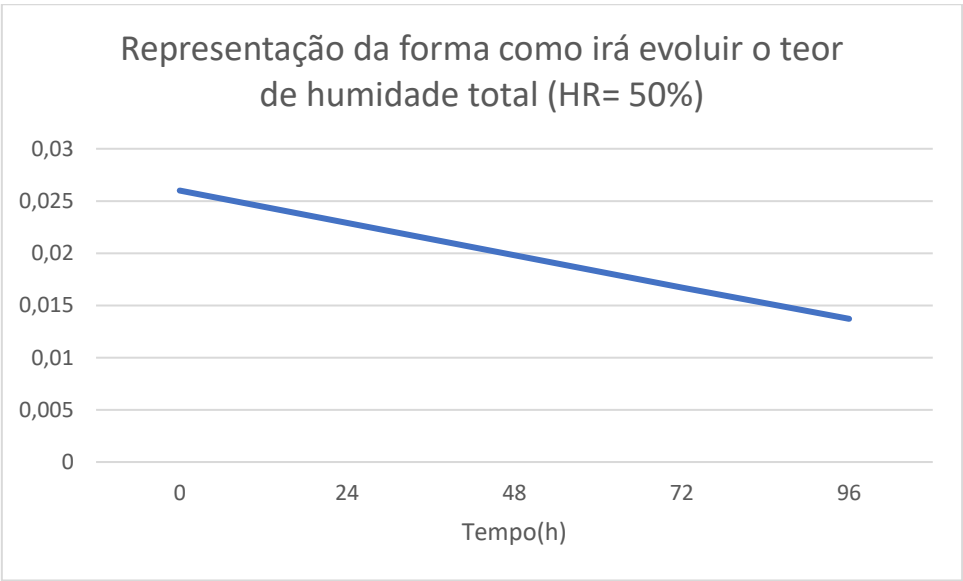
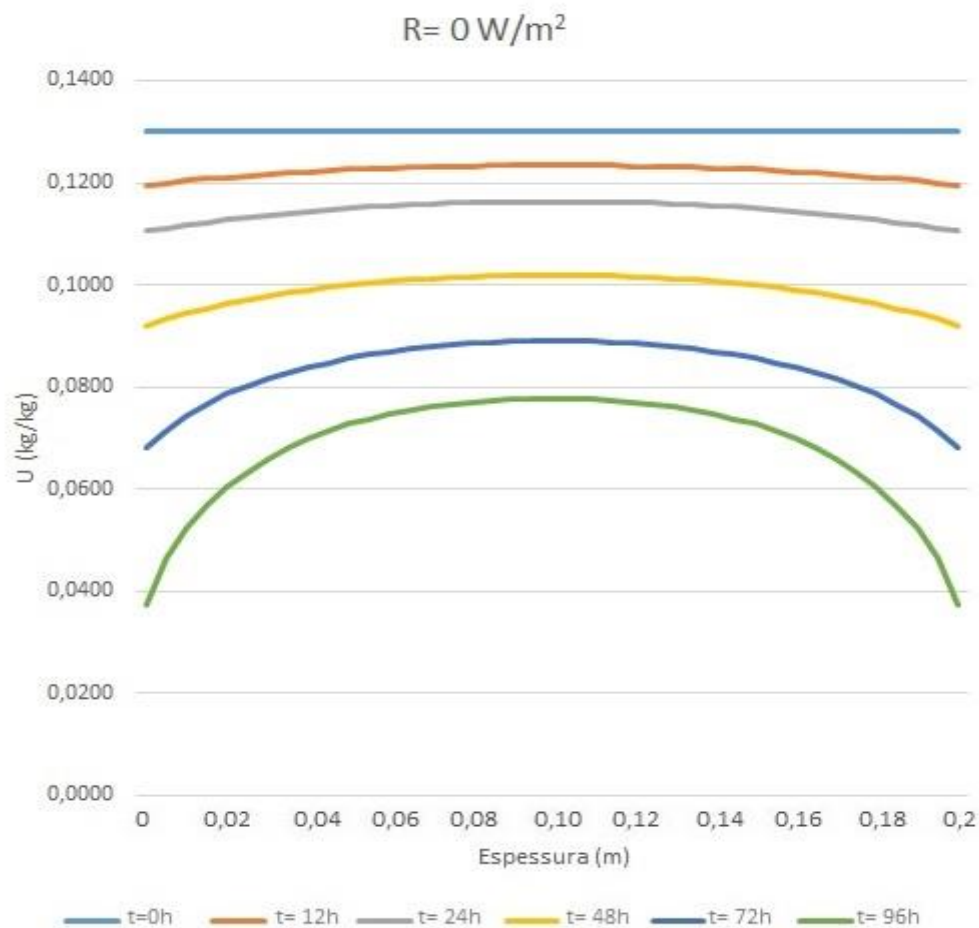


## **Anexo 4**

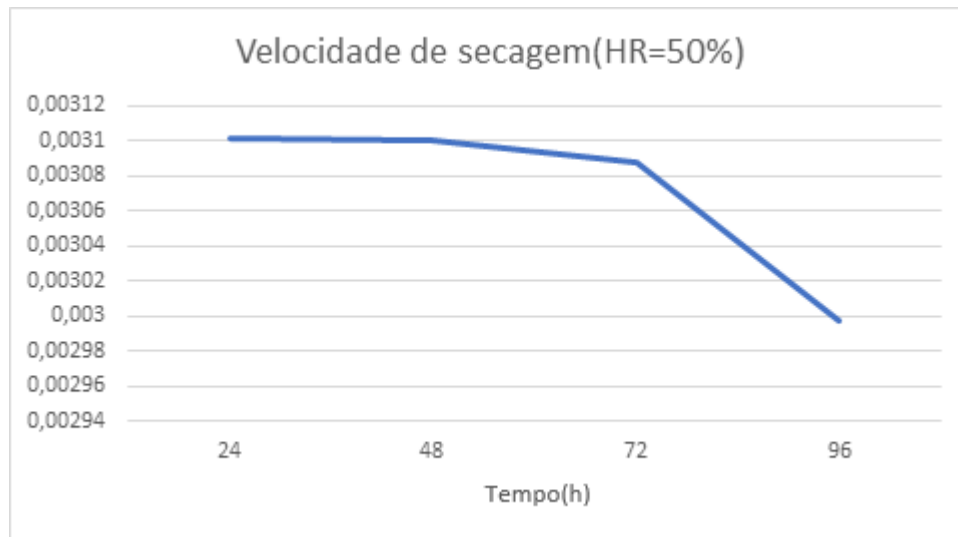
SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFLUENCIA DA RADIAÇÃO NA SENSIBILIDADE  
DO PROCESSO DE SECAGEM

SIMULAÇÕES PARA O BARRO VERMELHO

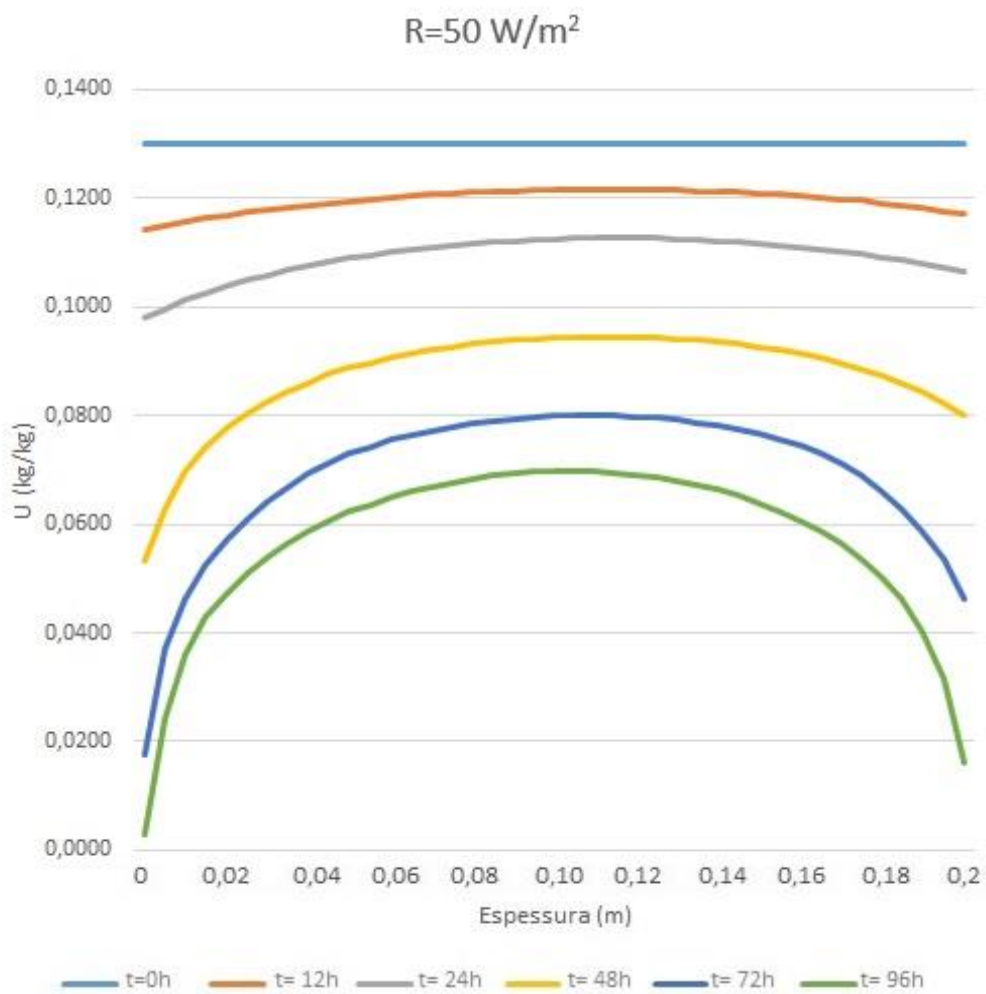
1BV-R

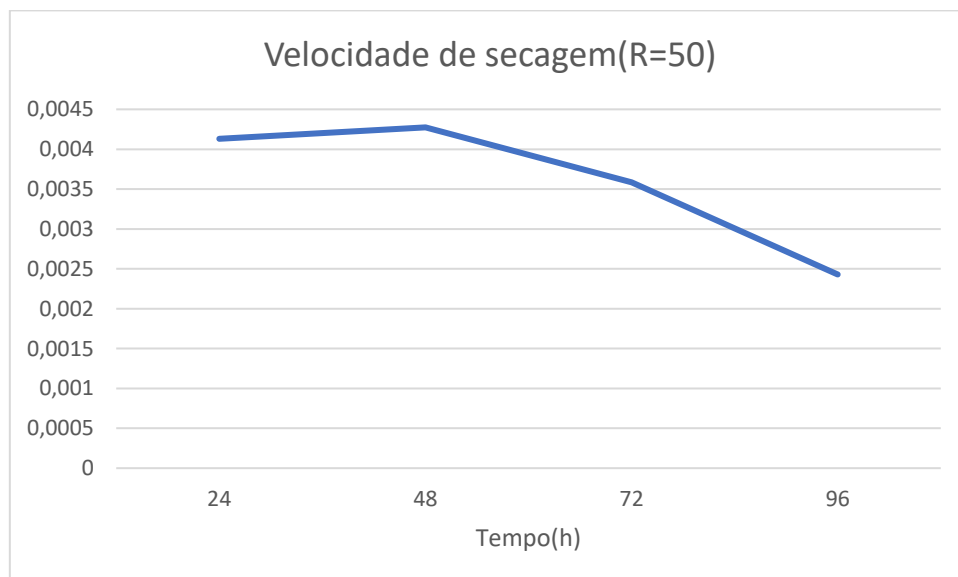
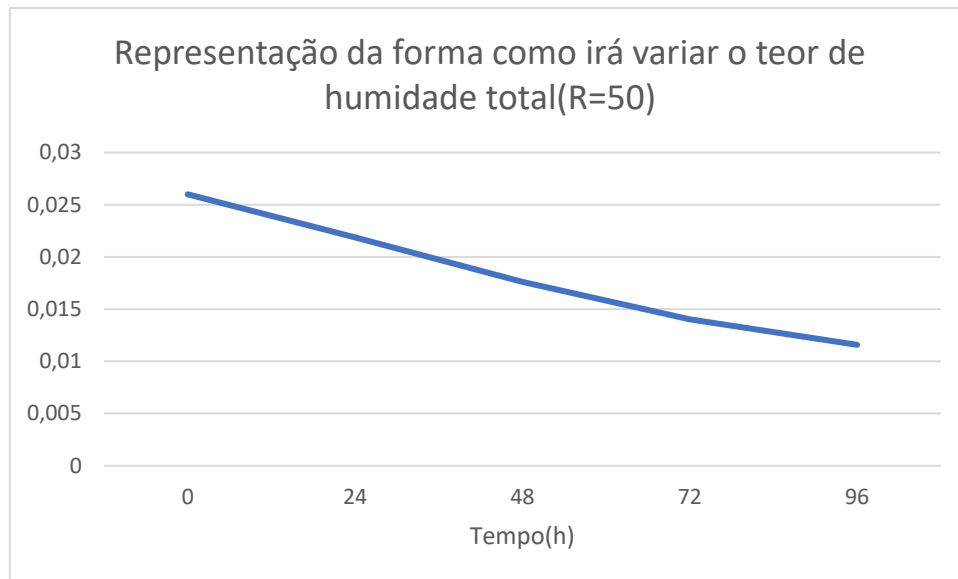




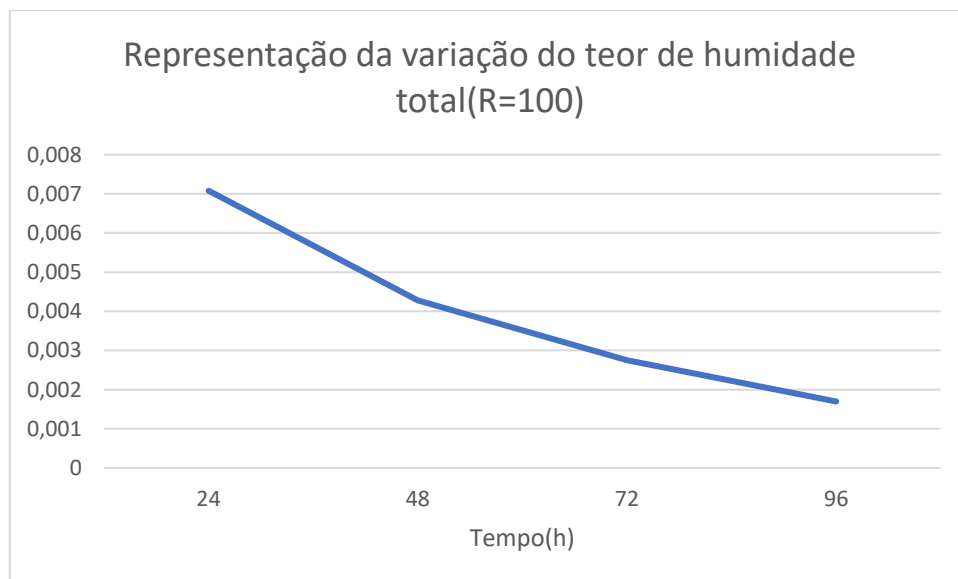
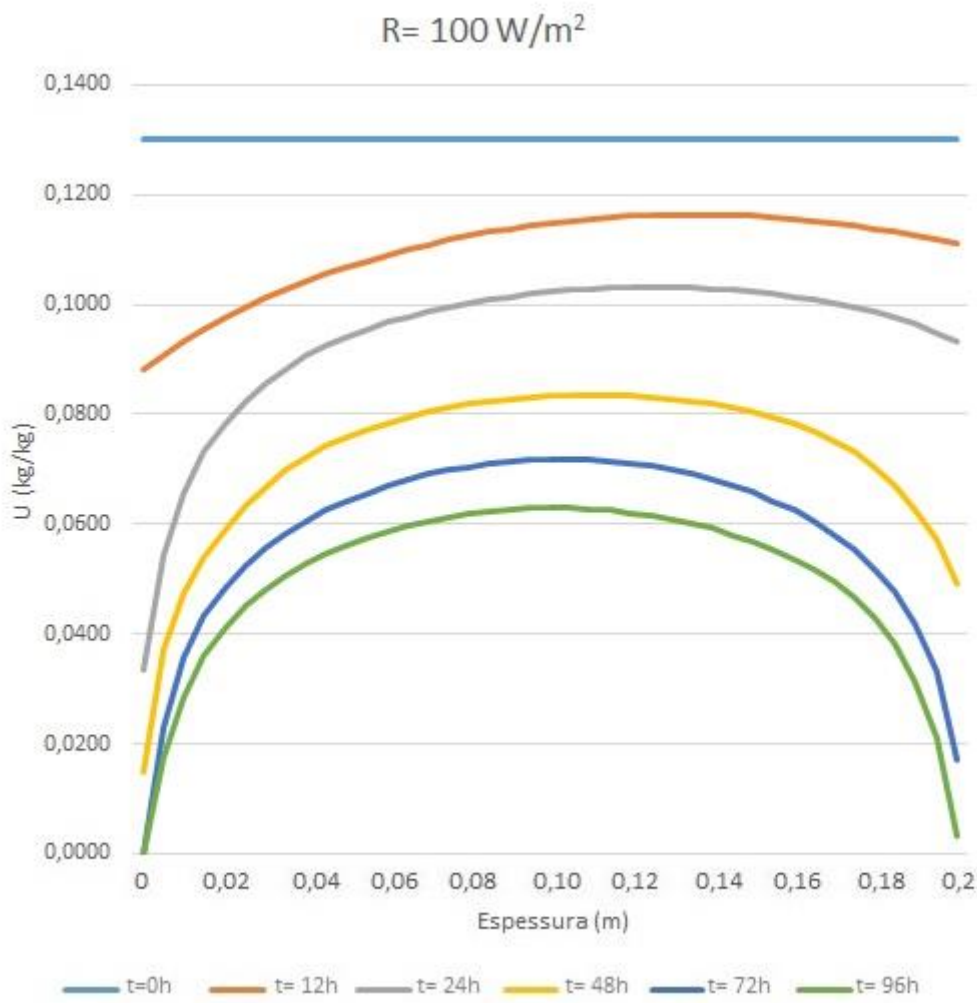


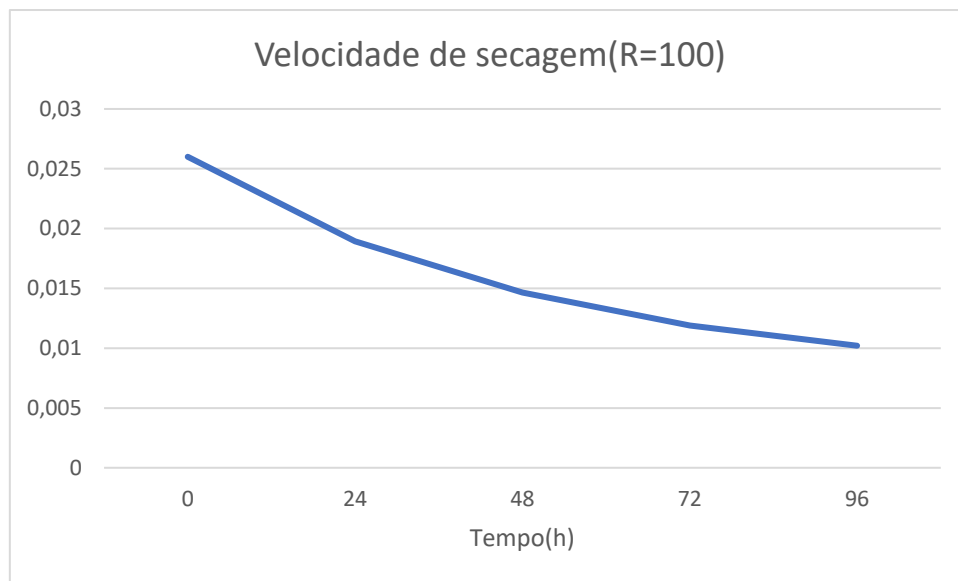
5BV-R





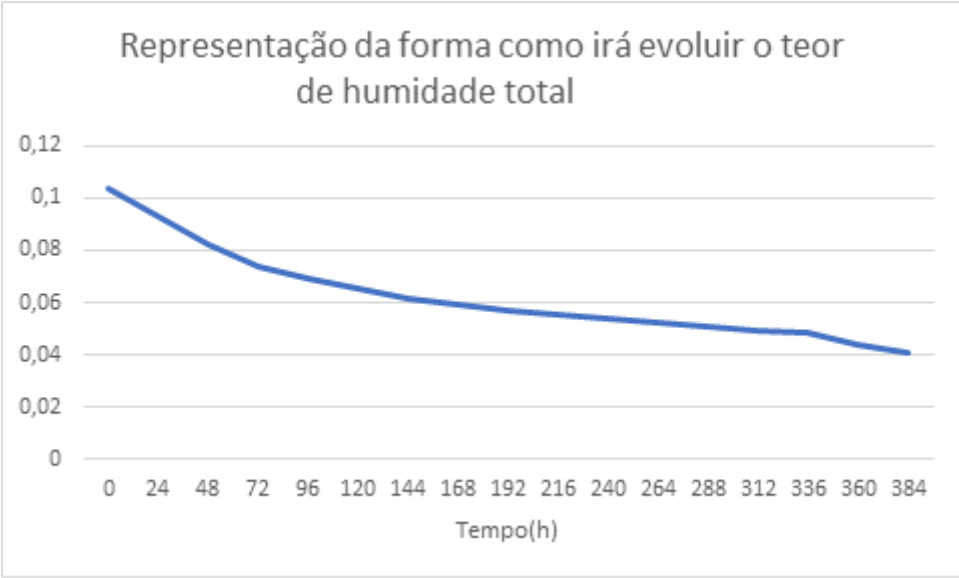
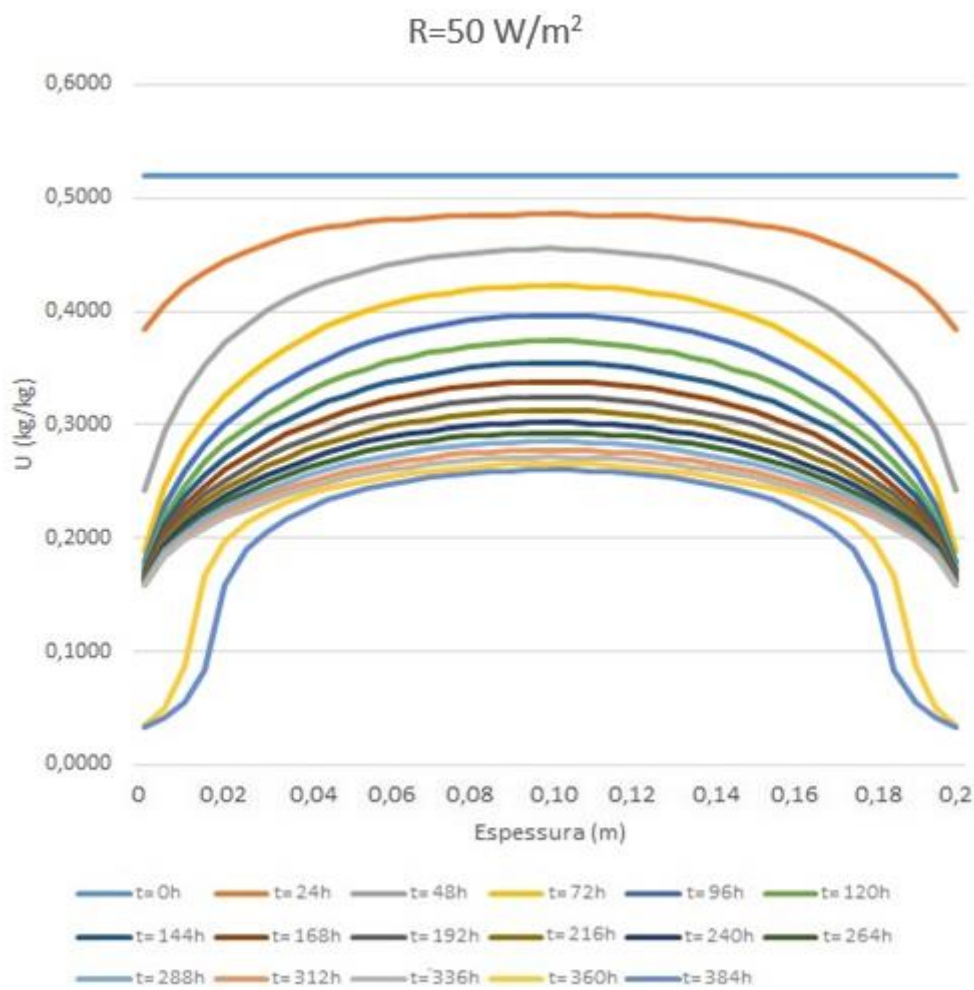
3BV-R

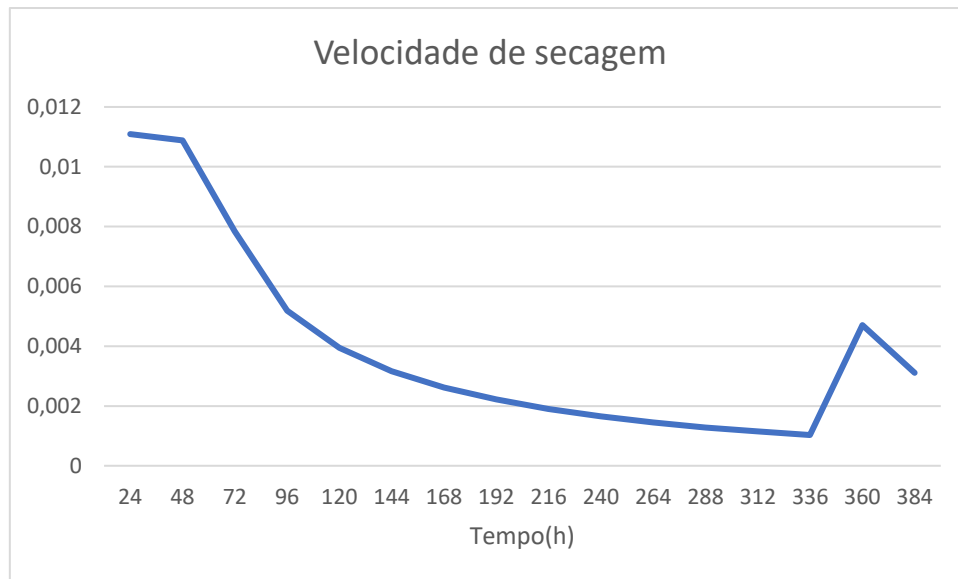




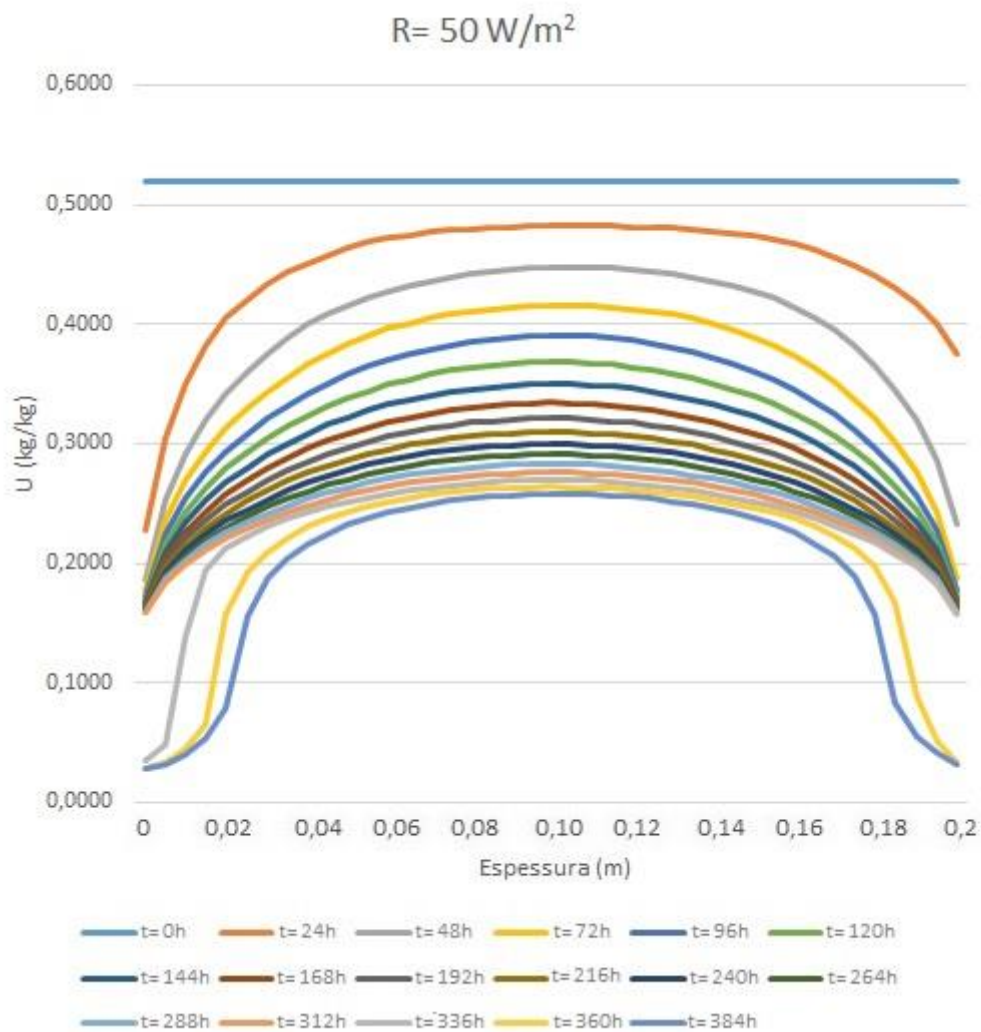
SIMULAÇÕES PARA O BETÃO CELULAR

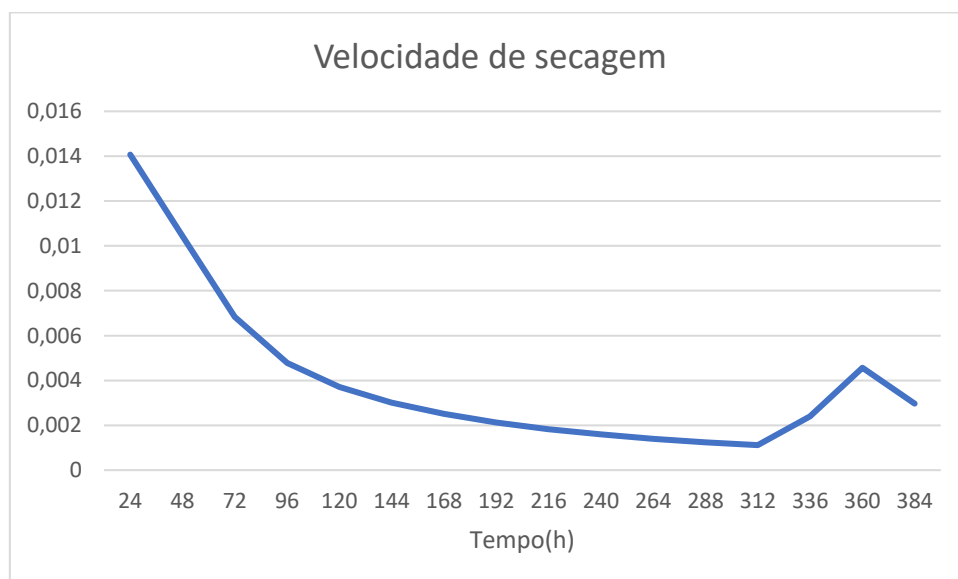
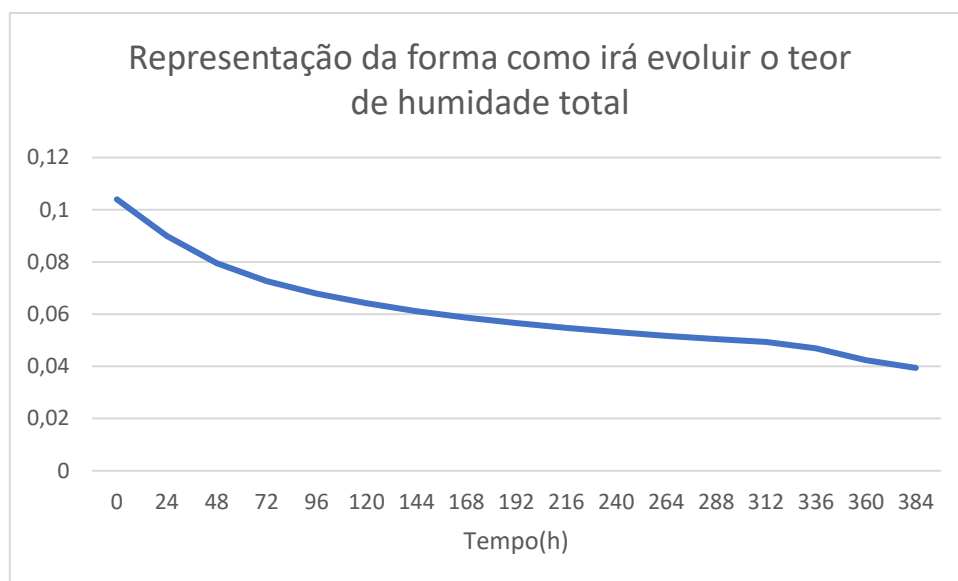
1BC-R





3BC-R





5BC-R

